

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 691.32:691.542

DOI: 10.22227/2305-5502.2024.1.9

Реологические свойства самоуплотняющихся легких бетонных смесей на полых микросферах

Сергей Дмитриевич Епихин, Александр Сергеевич Иноземцев

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В современном строительстве активно применяются технологии самоуплотняющегося бетона, развивающиеся в направлении технологии легких самоуплотняющихся бетонов (ЛСУБ). Основное преимущество ЛСУБ — уменьшение веса бетонных и железобетонных конструкций при сохранении структурной целостности, несущей способности и высокой подвижности. Цель исследования — оценка реологии течения исследуемых смесей в зависимости от варьируемых факторов В/Ц и концентрации пластификатора C_d и соотношения заполнителя (фракционированного песка и кварцевой муки).

Материалы и методы. Объектом исследования являются бетонные смеси на полых микросферах. Проектная средняя плотностью бетона 1400 кг/м^3 . Представлен следующий состав: портландцемент, керамические микросферы, комплексная кремнеземистая добавка, фракционный песок, кварцевая мука, гиперпластификатор и вода. Получены результаты исследования реологических характеристик ЛСУБ. Ключевыми реологическими параметрами приняты напряжение сдвига и вязкость.

Результаты. Снижение В/Ц отношения увеличивает вязкость и напряжение сдвига бетонной смеси вне зависимости от C_d . Похожая зависимость наблюдается у составов с варьируемой C_d , увеличение которой снижает густоту смеси, уменьшая вязкость и напряжение сдвига. Отмечено предельное значение C_d , при преодолении которого реологические показатели смесей стремятся к нулю по мере увеличения объема добавки. Оценка реологии смесей по уравнению Оствальда – Вейля показывает наибольшую значимость В/Ц отношения на густоту и возможность изменения характера течения смесей с псевдопластического на дилатантный при варьировании исследуемых факторов. Замена доли фракционированного песка мукой со 100 до 0 % увеличивает густоту смеси почти в 3 раза.

Выводы. Представлены результаты, определяющие возможность изменения реологического характера течения ЛСУБ на полых микросферах при варьировании исследуемых факторов. Выполнен сравнительный анализ полученных реологических кривых с использованием уравнения Оствальда – Вейля для тяжелых и легких бетонов с полыми микросферами смесей. Рассмотрена роль дисперсности заполнителя в управлении реологическими свойствами исследуемых ЛСУБ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: самоуплотняющиеся легкие бетоны, реология, полые микросферы, уравнение Оствальда – Вейля, напряжение сдвига, водоцементное отношение, концентрация пластификатора

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Епихин С.Д., Иноземцев А.С. Реологические свойства самоуплотняющихся легких бетонных смесей на полых микросферах // Строительство: наука и образование. 2024. Т. 14. Вып. 1. Ст. 9. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.1.9

Автор, ответственный за переписку: Сергей Дмитриевич Епихин, sergep97@mail.ru.

Rheological properties of self-compacting lightweight concrete mixtures on hollow microspheres

Sergey D. Epikhin, Aleksandr S. Inozemtsev

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

ABSTRACT

Introduction. Self-compacting concrete (SCC) technologies are actively used in modern construction, which are developing in the direction of lightweight self-compacting concrete (LWSCC) technology. The main advantage of LWSCC is to reduce the weight of concrete and reinforced concrete structures while maintaining structural integrity, load-bearing capacity and high mobility. The purpose of the study is to evaluate the rheology of the flow of the studied mixtures depending on the varying factors of W/C and the concentration of plasticizer C_p and the ratio of filler (fractionated sand and quartz flour).

Materials and methods. The object of the study is concrete mixtures on hollow microspheres. The design average concrete density is $1,400 \text{ kg/m}^3$. The following composition is presented: Portland cement, ceramic microspheres, complex silica additive, fractional sand, quartz flour, hyperplasticizer and water. The results of studies of the rheological characteristics of LWSCC were obtained. The key rheological parameters are shear stress and viscosity.

Results. Reducing the W/C increases the viscosity and shear stress of the concrete mix, regardless of the C_{pr} . A similar

dependence is observed in compositions with variable C_{pl} . An increase in C_{pl} reduces the density of the mixture, reducing viscosity and shear stress. The limiting value of C_{pl} is noted, when this value is overcome by rheological parameters of mixtures tend to zero as the volume of the additive increases. The evaluation of the rheology of mixtures using the Ostwald de Waele equation shows the greatest importance of the W/C ratio for density and the possibility of changing the flow pattern of mixtures from pseudoplastic to dilatant with varying studied factors. Replacing the fraction of fractionated sand with flour from 100 to 0 % increases the density of the mixture by almost three times.

Conclusions. The results determining the possibility of changing the rheological nature of the LWSCC flow on hollow microspheres with varying studied factors are presented. A comparative analysis of the obtained rheological curves is performed using the Ostwald de Waele equation for heavy and light mixtures with hollow microspheres. The role of filler dispersion in controlling the rheological properties of the studied LWSCC is considered.

KEYWORDS: self-compacting lightweight concretes, rheology, hollow microspheres, Ostwald de Waele equation, shear stresses, water-cement ratio, plasticizer concentration

FOR CITATION: Epikhin S.D., Inozemtsev A.S. Rheological properties of self-compacting lightweight concrete mixtures on hollow microspheres. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2024; 14(1):9. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.1.9

Corresponding author: Sergey D. Epikhin, sergep97@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Бетонные технологии в настоящее время заслуженно являются одними из приоритетных направлений развития строительного материаловедения. Большую популярность получили самоуплотняющиеся бетоны (СУБ) [1–3], что обусловлено способностью к самостоятельному равномерному заполнению пространства в опалубке без дополнительного внешнего воздействия и сохранением однородного распределения компонентов внутри формы [4, 5].

В последние годы наблюдается тенденция по снижению веса конструкций в целях сокращения нагрузки на ее несущие элементы. Для этого учеными-строителями активно разрабатываются технологии конструктивных легких бетонов, объединяющих в себе противоречивые свойства, такие как: высокая прочность и низкая плотность. В имеющемся мировом опыте получения подвижных легких бетонных смесей, как правило, применяются вспученные легкие заполнители, свойства которых ограничивают показатели качества бетона [6–9].

Для бетонных смесей, в особенности для СУБ, ключевыми показателями качества являются их реологические и технологические характеристики, а также особенности производства. Традиционно для описания реологии СУБ используют предел текучести при сдвиге τ_0 и пластическую вязкость μ . Проведено множество исследований [2, 10–15], в которых демонстрируется влияние таких факторов, как виды цемента, заполнителей, добавок и волокон на реологию бетонной смеси, также установлены основные параметры качества для СУБ. В работе [2] показано, что вторичное использование переработанного заполнителя в бетоне способствует как увеличению предела текучести, так и пластической вязкости. Использование золы уноса с низким содержанием кальция (менее 10 %) и измельченного гранулированного доменного шлака способствует снижению указанных показателей, что объясняется эффектом шарикоподшипника частиц сферической формы и меньшей химической активности гладкой поверхности зерен по сравнению с портландцемен-

том соответственно. Обратный эффект наблюдается при применении золы уноса с высоким содержанием оксида кальция, что связано с нерегулярными размерами и ячеистой структурой частиц. Введение различных видов волокон, размеров, формы и количества способствует увеличению предела текучести и пластической вязкости. Использование пластифицирующих добавок закономерно уменьшает величину реологических показателей [15]. Особая роль поликарбоксилатных пластификаторов в характере течения цементно-минеральных смесей показана в публикациях [16, 17].

В работе [18] исследовали реологические характеристики бетонной смеси при частичной замене цемента полыми стеклянными микросферами. Установлено, что бетонная смесь, содержащая полые стеклянные микросферы в количестве 5 % от массы вяжущего, имеет более высокий статический и динамический предел текучести и более низкую вязкость, чем контрольная смесь (без микросфер). Начало течения такой бетонной смеси и его поддержание происходит при более высоких напряжениях сдвига.

Несмотря на существующий опыт получения самоуплотняющихся легких бетонов, положительные результаты свойственны, как правило, составам со средней плотностью не ниже 1800 кг/м³. При этом реологические характеристики самоуплотняющихся бетонных смесей во многом остаются неизученными, особенно для составов с большим содержанием легкого заполнителя. В связи с этим возникает закономерная задача по установлению реологических параметров самоуплотняющихся легких бетонов с низкой средней плотностью (высоконаполненных легким заполнителем).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования — легкие бетонные смеси на полых микросферах, включающие следующие компоненты [3, 19, 20]:

- портландцемент ЦЕМ I 42,5 (ПЦ), соответствующий требованиям ГОСТ 10178–85 (химико-минералогический состав представлен в табл. 1);

- комплексная кремнеземистая добавка Frem-Silica-2 (МКМ), соответствующая ТУ ВУ 190669631.001–2011МК-85¹;
- керамические микросферы (МС) ForeSphere², свойства которых приведены в табл. 2;
- фракционный песок (P_{ϕ}) фр. 0,16–0,63 мм;
- кварцевая мука P_m , которая представляет собой тонкий песок, полученный путем помола до $S_{уд} = 700 \pm 20 \text{ м}^2/\text{кг}$;
- поликарбоксилатный пластификатор Melflux 2651F³;
- вода.

Соотношение компонентов смеси соответствовало проектной средней плотности бетона 1400 кг/м^3 .

В качестве прототипов для сравнительной оценки свойств исследуемых легких бетонов ис-

пользованы составы самоуплотняющегося тяжелого бетона, отличающиеся содержанием воды и пластификатора: прототип 1 — $V/C = 0,5$, $C_d = 1,4 \%$; прототип 2 — $V/C = 0,45$, $C_d = 1,2 \%$. Соотношение компонентов в исследуемых бетонных смесях устанавливалось в соответствии с табл. 3.

Исследуемый состав легких бетонов включает минеральную фазу различной дисперсности — кварцевый песок: фракционированный и тонкий (мука). Варьирование соотношения тонкой и фракционированной частиц (табл. 4) песка позволяет проследить вклад компонентов идентичного минерального состава в распределение воды в дисперсной системе при постоянном расходе всех составляющих легкого бетона (табл. 3), $V/C = 0,5$ и $C_d = 1$. Общее объемное содержание кварцевых компонентов в смеси легкого бетона составляет $P_m + P_{\phi} = \text{const} = 8,7 \%$.

Для исследования реологических свойств легких самоуплотняющихся бетонов (ЛСУБ) рассмотрено влияние в рамках двухфакторного композиционного плана экспериментов, где в качестве варьируемых факторов выбраны X_1 — количество воды (V/C) и X_2 — концентрация пластификатора (C_d , % от массы цемента). Основные уровни составили

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

² ForeSphere. URL: <https://foresphere.com/catalog/alyumos-iliikatnye-mikrosfery/>

³ ЕВРОХИМ-1 ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ДОБАВКИ. URL: <https://www.eurohim.ru/catalog/dobavki-dlya-suhih-stroitelnyh-smesey/dobavki-dlya-suhih-stroitelnyh-smesey/superplastifikatory/melflux>

Табл. 1. Химический и минералогический состав клинкера

Оксиды							Минералы			
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. Свойства полых керамических микросфер ForeSphere

Свойство	Значение
Насыпная плотность, кг/м ³	320–370
Истинная плотность, кг/м ³	580–690
Средний размер частиц, мкм	100
Толщина стенок микросферы, мкм	2–10
Плотность материала стенки, кг/м ³	2500
Предел прочности на сжатие, МПа	15,0–28,0
Твердость по шкале Мооса	5–6

Табл. 3. Соотношение компонентов исследуемых смесей

Состав	Объемное содержание, %				
	ПЦ	МКМ	P_m	P_{ϕ}	МС
Легкий бетон	20,0	3,1	2,2	6,5	46,4
Прототип 1 (тяжелый бетон)	20,0	3,1	14,1	41,0	0,0
Прототип 2 (тяжелый бетон)	20,0	3,1	14,1	41,0	0,0

Табл. 4. Объемное содержание компонентов минеральной фазы в исследуемых смесях при различном соотношении P_m/P_{ϕ}

Компонент	Объемное содержание P_m , %				
	0/100	25/75	50/50	75/25	100/0
Кварцевая мука S_p	0,0	2,2	4,35	6,5	8,7
Фракционированный песок S_f	8,7	6,5	4,35	2,2	0,0

значения 0,5 и 1,4, интервалы варьирования — 0,1 и 0,4 % соответственно.

Для изучения свойств исследуемых бетонных смесей применялся метод математического планирования эксперимента. Использована следующая стандартная двухфакторная модель:

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

Поиск коэффициентов уравнения позволил установить зависимость параметров качества Y от переменных факторов (X_1 и X_2), что позволяет значительно сократить количество экспериментов.

Исследование реологических свойств выполнялось по вязкости и напряжению сдвига бетонной смеси с применением ротационного вискозиметра MCR 101 (рис. 1). Методика определения реологических параметров заключается в измерении момента сопротивления испытываемой бетонной смеси перемещению измерительной системы, погруженной в смесь. Измерительная система представляет собой металлический шар диаметром 8 мм, совершающий орбитальное перемещение с линейным приращением скорости сдвига до величины 1 с^{-1} в течение 60 с.

Испытания осуществлялись согласно следующему алгоритму: 1) гомогенизация сухих компонентов смеси; 2) добавление воды с растворенным пластификатором; 3) перемешивание бетонной смеси согласно ГОСТ 30744; 4) заполнение испытательной чаши вискозиметра, позиционирование измерительной системы в нулевое положение, стабилизация системы (продолжительность 9 мин); 5) измерение. Полное время проведения испытания бетонной смеси после ее приготовления составляет 22 ± 2 мин. Измерения проводились в два повторения с промежуточным этапом гомогенизации. После испытания бетонная смесь подвергалась повторной гомогенизации и укладке в формы без уплотнения для изготовления стандартных образцов-призм $40 \times 40 \times 160$ мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для каждого состава в соответствии с вышеуказанным планом экспериментов получены реологические кривые, описывающие зависимость вязкости и напряжения сдвига от скорости сдвига (рис. 2).

В соответствии с многоточечным планом эксперимента полученные графики реологических кривых можно сгруппировать по диапазонам вязкости, в которых происходит изменение при увеличении скорости сдвига. Наибольшую вязкость ($\mu > 100 \text{ Па} \cdot \text{с}$) имеют составы с $В/Ц < 0,4$, при $В/Ц = 0,5$ вязкость изменяется в диапазоне от 40 до 90 $\text{Па} \cdot \text{с}$, а третью группу формируют составы, вязкость которых не превышает 25 $\text{Па} \cdot \text{с}$ (рис. 2, а).



Рис. 1. Определение вязкости и напряжения сдвига бетонной смеси на полых микросферах с помощью ротационного вискозиметра MCR 101

Составы первой группы ($В/Ц < 0,4$) характеризуются наибольшей густотой с разжижением при увеличении скорости сдвига до вязкости 400–800 $\text{Па} \cdot \text{с}$ (рис. 2, а). Для смесей с $В/Ц = 0,36$ и $C_d = 1,4 \%$ и $В/Ц = 0,4$ и $C_d = 1,0 \%$ при начальных скоростях сдвига наблюдается интенсивное разжижение — вязкость интенсивно уменьшается, сменяясь сопоставимым увеличением. Подобное поведение дисперсной системы связано с выстраиванием структурных элементов под действием сдвигающего усилия и последующим их уплотнением в связи с уменьшением расстояния между зернами дисперсной фазы. После достижения скорости сдвига более $0,1\text{--}0,15 \text{ с}^{-1}$ вязкость снижается, что связано с преодолением порога сопротивления течению. Большой объем смеси в этот момент времени приобретает движение. Также для этих составов можно видеть участки противоположного изменения вязкости и напряжения сдвига при увеличении скорости сдвига при значениях около $0,3$ и $0,6 \text{ с}^{-1}$. Это объясняется нарушением сплошности вследствие создания пустот внутри объема смеси, образовавшихся из-за высокой густоты и, как следствие, низкой ее способности к заполнению свободного пространства, которая формируется при движении измерительной системы («шар» вискозиметра).

Закономерным является увеличение вязкости и напряжения сдвига при снижении $В/Ц$ отношения вне зависимости от концентрации пластификатора. Аналогичную закономерность можно отметить для составов с варьируемой C_d , увеличение которой приводит к снижению густоты смеси, выраженной меньшей величиной вязкости и напряжения сдвига. При этом наблюдается предел для концентрации пластификатора, когда его количество перестает оказывать влияние на исследуемые реологические показатели. Так, на составах с $В/Ц$ отношением 0,5 видно, что изменение концентрации добавки более $C_d > 1,4 \%$ не отражается на графиках зависимости вязкости и напряжения сдвига от скорости сдвига (рис. 2, б). То есть изменить распределение воды в системе увеличением количества пластификатора более невозможно. Сравнение графиков для бетон-

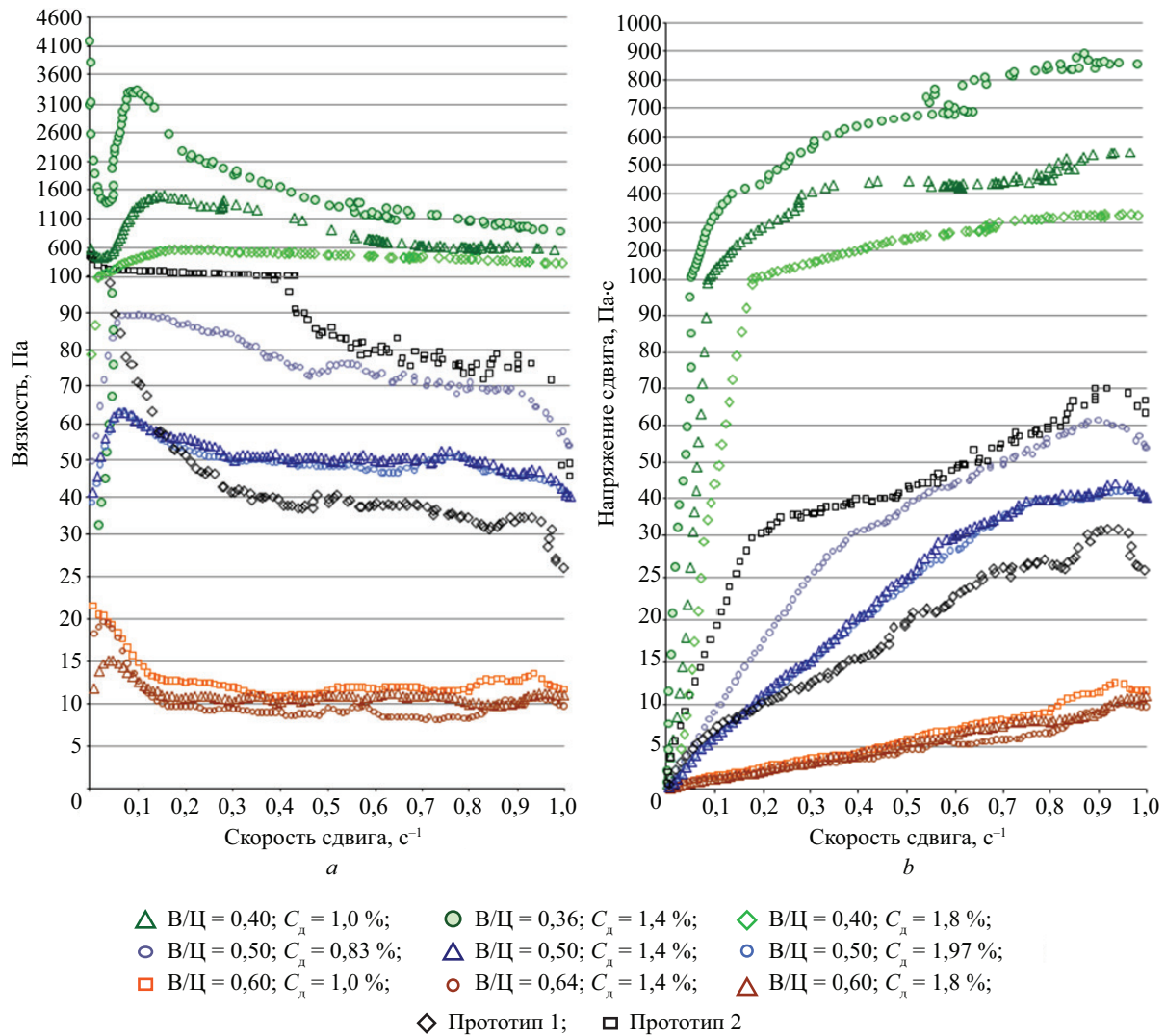


Рис. 2. График зависимости вязкости (а) и напряжения сдвига (б) от скорости сдвига для легких бетонных смесей на полых микросферах и тяжелых бетонных смесях при варьировании В/Ц отношения и концентрации пластификатора

ных смесей с В/Ц = 0,5 и C_д = 1,4 %, но разной плотности показывает, что состав без полых микросфер (прототип 1) имеет меньшую вязкость и напряжение сдвига, а также характеризуется равномерным их изменением, что свидетельствует о лучшей текучести и сплошности системы. Это может быть связано с влиянием легкой дисперсной фазы (полых микросфер), которая имеет меньший размер и плотность по сравнению с заменяемым кварцевым песком. Таким образом, тонкие частицы легкого заполнителя требуют больше воды, а интенсивность течения уменьшается пропорционально гравитационному воздействию, зависящему от плотности. Однако состав тяжелого бетона с указанным соотношением В/Ц и C_д склонен к отделению воды, что свидетельствует о ее избытке. Снижение величины варьируемых факторов до В/Ц = 0,45 и C_д = 1,2 % позволило получить прототип однородной смеси тяжелого бетона. Очевидно, что вязкость и напряжение сдвига такого состава выше и могут выступать в качестве

ориентировочных диапазонов для получения однородной смеси.

Группу бетонных смесей с вязкостью менее 25 Па·с формируют составы с В/Ц = 0,6. Графики вязкости и напряжения сдвига не имеют различных отличий при варьировании концентрации пластификатора.

Сравнительный анализ полученных реологических кривых напряжения сдвига от скорости сдвига (рис. 2, б) можно выполнить с использованием уравнения Оствальда – Вейля:

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

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 реологические уравнения для каждого состава, согласно плану эксперимента, ис-

пользованы для установления уравнений регрессии $Y = f(X_1; X_2)$:

$$Y_3 = 47,0 - 390,9 \cdot X_1 - 37,0 \cdot X_2 + 64,6 \cdot X_1 X_2 + 294,3 \cdot X_1^2 + 7,4 \cdot X_2^2;$$

$$Y_4 = 0,966 - 0,077 \cdot X_1 + 0,029 \cdot X_2 - 0,063 \cdot X_1 X_2,$$

где Y_3 — коэффициент k из уравнения Оствальда – Вейля; Y_4 — коэффициент n из уравнения Оствальда – Вейля.

Анализ полученных уравнений показывает, что коэффициент густоты k имеет более значительное изменение от варьирования В/Ц отношения, чем концентрация добавки. При этом оба этих фактора способствуют уменьшению величины этого критерия. Отметим положительный знак коэффициентов B_{12} , B_{11} и B_{22} уравнения Y_3 . Это свидетельствует об изменении характера как взаимного влияния X_1 и X_2 , так и при существенном увеличении их значения. То есть как избыток количества воды и пластификатора, так и взаимное их влияние приводит к увеличению густоты бетонной смеси. Подобное можно объяснить нарушением однородности дисперсных систем, когда превышение порогового количества варьируемых факторов приводит к нарушению баланса воды. В таком случае наблюдается отделение воды и, как следствие, расслоение смеси, что может быть связано с уменьшением толщины водной прослойки и увеличением трения между твердыми частицами.

Уравнение Y_4 демонстрирует величину коэффициента $n < 1$ при значениях варьируемых факторов, соответствующих основным уровням варьирования

($B_0 = 0,966$). То есть такая дисперсная система характеризуется псевдопластическим течением, когда бетонная смесь начинает течь при минимальных значениях сдвиговых нагрузок, а с увеличением скорости сдвига напряжение сдвига изменяется с затухающей интенсивностью. Усиление этому реологическому поведению придает В/Ц отношение и его совокупное влияние с пластификатором, о чем свидетельствует знак «–» перед коэффициентами B_1 и B_{12} . В то же время коэффициенты уравнения, отражающие влияние исследуемых факторов, показывают возможность изменения критерия Y_4 в область $n > 1$. То есть характер течения бетонной смеси в зависимости от величины В/Ц отношения и концентрации пластификатора может меняться на дилатантный. В такой системе цементно-минеральное тесто формирует прослойку между частицами дисперсной фазы, способствуя снижению трения, а с увеличением скорости сдвига напряжение сдвига изменяется с растущей интенсивностью. Как видно из уравнения $Y_4 = f(X_1; X_2)$, ключевым фактором, способствующим стремлению к такому поведению исследуемой дисперсной системы, является концентрация пластификатора (коэффициент B_2).

Таким образом, полученные модели показывают сложный характер влияния исследуемых факторов на реологию легких бетонных смесей, которая требует комплексной оптимизации по показателям-антагонистам. При этом в качестве целевого аналога по характеру течения смесей обосновано считать самоуплотняющийся мелкозернистый тяжелый бетон. Так как течение смесей определяется особен-

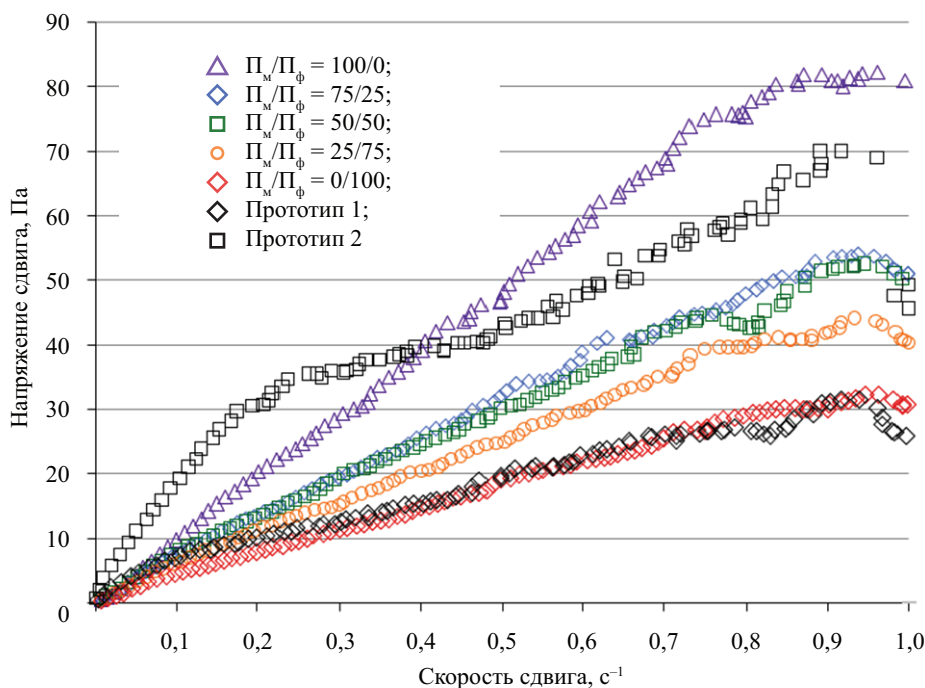


Рис. 3. Реологические кривые течения легких бетонных смесей с варьированием соотношения фракционного песка и кварцевой муки (В/Ц = 0,5 и $C_d = 1,4\%$) и тяжелых бетонных смесей

Табл. 5. Параметры уравнений Оствальда – Вейля, описывающих реологические кривые течения легких бетонных смесей с варьированием соотношения фракционного песка и кварцевой муки

Коэффициенты уравнения Оствальда – Вейля	П _м /П _ф					Прототип 1	Прототип 2
	0/100	25/75	50/50	75/ 25	100/0		
<i>k</i>	35,4	49,9	57,7	62,0	102,9	31,2	77,7
<i>n</i>	0,94	0,97	0,94	0,97	1,07	0,68	0,63

ностями распределения воды (при прочих равных рецептурных условиях), то, помимо ее количества, важнейшим фактором является суммарная площадь поверхности сухих компонентов. Роль дисперсности в управлении реологическими свойствами исследуемых бетонных смесей продемонстрирована на рис. 3 и в табл. 5.

На рис. 3 закономерно наблюдается увеличение густоты бетонной смеси при увеличении доли кварцевой муки, что отражается в пропорционально больших значениях напряжения сдвига. Это также заметно по изменению коэффициента *k* в уравнениях Оствальда – Вейля, полученных для каждой из кривых. Видно, что замена доли фракционированного песка мукой со 100 до 0 % способствует увеличению коэффициента густоты почти в 3 раза — с 35,4 до 102,9. Указанный диапазон объясняется затрачиванием воды на смачивание большей суммарной площади поверхности кварцевой части. Изменение величины коэффициента *n* свидетельствует об изменении характера течения от псевдопластического (*n* < 1) к дилатантному (*n* > 1) при увеличении доли тонкого компонента П_м, что объясняется заменой кварцевого песка, являющегося дисперсной фазой, на кварцевую муку — составную часть цементно-минерального теста.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты позволяют сформулировать следующие выводы:

- оценка реологии течения исследуемых смесей с помощью коэффициентов уравнения Оствальда – Вейля показывает, что В/Ц отношение является более значимым фактором на густоту бетонной смеси *k*, чем концентрация пластификатора. При этом закономерно наблюдается снижение густоты исследуемых дисперсных систем при увеличении как В/Ц, так и *C_д*;
- полученные уравнения регрессии для показателя *n* в уравнении Оствальда – Вейля демонстрируют возможность изменения характера течения смесей с псевдопластического (*n* < 1) на дилатантный (*n* > 1) при варьировании исследуемых факторов;
- замена доли фракционированного песка мукой со 100 до 0 % способствует увеличению густоты почти в 3 раза, что закономерно объясняется большей суммарной площадью поверхности кварцевой части в смеси.

Перспективой развития темы является установление влияния исследуемых факторов на однородность смесей и прочностные свойства затвердевшего бетона, поиск и установление параметров и граничных значений расслоения после внешнего воздействия на бетонную смесь перед формованием.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. 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

2. Mandal R., Panda S.K., Nayak S. Rheology of concrete: critical review, recent advancements, and future perspectives // Construction and Building Materials. 2023. Vol. 392. P. 132007. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132007

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

4. 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 XLVQJV.

5. Мозгалева К.М., Головнев С.Г. Самоуплотняющиеся бетоны: возможности применения и свойства // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2011. № 4. С. 55–60. EDN ONJNAZ.

6. Сумин А.С. Легкие самоуплотняющиеся бетоны и их перспективы // Новое слово в науке: стратегии развития : сб. мат. V Междунар. науч.-практ. конф. 2018. С. 10–14. EDN OUYFSS.

7. Сумин А.С. Легкий самоуплотняющийся бетон — будущее монолитного домостроения // Наука, образование, общество: тенденции и перспективы развития : сб. мат. VI Междунар. науч.-практ. конф. 2017. С. 354–358. EDN YZEBVJ.

8. Бычков М.В., Удодов С.А. Легкий самоуплотняющийся бетон как эффективный конструкционный материал // Интернет-журнал «Науковедение». 2013. № 4 (17). С. 41. EDN RSHDSB.

9. Adhikary S.K., Ashish D.K., Rudzionis Ž. Expanded glass as light-weight aggregate in concrete —

a review // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 313. P. 127848. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127848

10. 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

11. 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

12. 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

13. Karim Md.R., Zain Muhammad F.M., Jamil M., Lai Fook C., Islam Md.N. Use of wastes in construction industries as an energy saving approach // Energy Procedia. 2011. Vol. 12. Pp. 915–919. DOI: 10.1016/j.egypro.2011.10.120

14. Rafeet A., Vinai R., Soutsos M., Sha W. Effects of slag substitution on physical and mechanical properties of fly ash-based alkali activated binders (AABs) // Cement and Concrete Research. 2019. Vol. 122. Pp. 118–135. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.05.003

15. Zeyad A.M., Almalki A. Influence of mixing time and superplasticizer dosage on self-consolidating

concrete properties // Journal of Materials Research and Technology. 2020. Vol. 9. Issue 3. Pp. 6101–6115. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.04.013

16. Иноземцев А.С., Королёв Е.В., Доунг Т.К. Структурная модель течения пластифицированных цементно-минеральных смесей // Строительные материалы. 2020. № 4–5. С. 90–96. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-90-96. EDN CVBCCH.

17. Иноземцев А.С., Королев Е.В. Условия проявления аномалии течения пластифицированных цементно-минеральных смесей // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 12. С. 23–30. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.12.23-30. EDN GMURMO.

18. Nemocón S.A.G., Marriaga J.M.L., Suárez J.D.P. Rheological and hardened properties of self-compacting concrete using hollow glass microspheres as a partial replacement of cement // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 342. P. 128012. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128012

19. Патент RU № 2548303. Высокопрочный легкий фибробетон / Королев Е.В., Иноземцев А.С.; заявл. № 2014114357/03 от 11.04.2014. Оpubл. 20.04.2015. EDN ZFGSHZ

20. Inozemtsev A.S., Epikhin S.D. Conditions for the preparation of self-compacting lightweight concrete with hollow microspheres // Materials. 2023. Vol. 16. Issue 23. P. 7288. DOI: 10.3390/ma16237288

Поступила в редакцию 26 декабря 2023 г.

Принята в доработанном виде 16 января 2024 г.

Одобрена для публикации 23 января 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Сергей Дмитриевич Епихин — аспирант, преподаватель кафедры строительного материаловедения; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; serger97@mail.ru;

Александр Сергеевич Иноземцев — кандидат технических наук, 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; InozemtcevAS@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.

INTRODUCTION

Concrete technologies are now deservedly one of the priority areas of development of construction material science. Self-compacting concrete (SCC) has become very popular [1–3], which is due to the ability to fill the space in the formwork uniformly without additional external influence and maintaining a homogeneous distribution of components inside the mould [4, 5].

In recent years, there has been a tendency to reduce the weight of structures in order to reduce the load on its load-bearing elements. For this purpose, construction scientists are actively developing technologies of structural lightweight concrete combining contradictory properties such as high strength and low density. In the available world experience of obtaining mobile lightweight concrete mixtures, as a rule, foamed light-

weight aggregates are used, the properties of which limit the quality indicators of concrete [6–9].

For concrete mixtures, especially for SCC, the key quality indicators are their rheological and technological characteristics, as well as production characteristics. Traditionally, the shear yield strength τ_0 and plastic viscosity μ are used to describe the rheology of SCC. Many studies have been carried out [2, 10–15], which demonstrates the influence of factors such as types of cement, aggregates, additives and fibres on the rheology of concrete mixes, also established the basic quality parameters for SCC. In the publication [2] it is shown that the recycling of recycled aggregate in concrete favours both yield strength and plastic viscosity. The use of fly ash with low calcium content (less than 10 %) and crushed granulated blast furnace slag contributes to the reduction of the above indices, which is explained by the ball bearing effect of spherical shaped particles and lower chemical activity of the smooth surface of grains compared to Portland cement, respectively. The opposite effect is observed when using fly ash with high calcium oxide content, which is due to the irregular size and cellular structure of the particles. The introduction of different types of fibres, size, shape and quantity helps to increase the yield strength and plastic viscosity. The use of plasticizing additives naturally decreases the value of rheological parameters [15]. The special role of polycarboxylate plasticizers in the character of flow of cement-mineral mixtures is shown in publications [16, 17].

In the publication [18] investigated the rheological characteristics of concrete mixture at partial replacement of cement with hollow glass microspheres. It was found that the concrete mixture containing hollow glass microspheres in the amount of 5 % of the binder weight has higher static and dynamic yield strength and lower viscosity than the control mixture (without microspheres). The flow of such a concrete mix starts and is maintained at higher shear stresses.

Despite the existing experience in the production of self-compacting lightweight concrete, the positive results are usually characteristic of compositions with an average density of at least 1,800 kg/m³. However, the rheological characteristics of self-compacting concrete mixtures remain largely unexplored, especially for compositions with a high content of lightweight aggregate. In this connection, there is a natural task to establish the rheological parameters of self-compacting lightweight concrete with low average density (highly filled with lightweight aggregate).

MATERIALS AND METHODS

The object of research — lightweight concrete mixtures on hollow microspheres, including the following components [3, 19, 20]:

- portland cement CEM I 42.5 (PC), complying with the requirements of GOST 10178–85 (chemical and mineralogical composition is presented in Table 1);
- complex silica additive FremSilica-2 (MCM), conforming to TY BY 190669631.001–2011MK–85¹;
- ForeSphere² ceramic microspheres (MS), the properties of which are given in Table 2;
- fractional sand (S_f) fr. 0.16–0.63 mm;
- Silica flour P_m , which is a fine sand obtained by grinding to $S_{sp} = 700 \pm 20$ m²/kg;
- Melflux 2651F polycarboxylate plasticizer³;
- water.

The ratio of mix components corresponded to the designed average density of concrete of 1,400 kg/m³.

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

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

³ Eurochem-1 functional additives. URL: <https://www.eurohim.ru/catalog/dobavki-dlya-ssuhyh-stroitelnyh-smesey/dobavki-dlya-suyih-stroitelnyh-smesey/superplastifikatory/melflux>

Table 1. Chemical and mineralogical composition of clinker

Oxides							Minerals			
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O ₂	C ₃ S ₃	C ₃ S ₂	C ₃ A ₃	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

Table 2. Properties of ForeSphere hollow ceramic microspheres

Property	Value
Bulk density, kg/m ³	320–370
True density, kg/m ³	580–690
Average particle size, μ m	100
Microsphere wall thickness, μ m	2–10
Wall material density, kg/m ³	2,500
Compressive strength, MPa	15.0–28.0
Mohs hardness	5–6

Table 3. Ratio of components of the tested mixtures

Composition	Volume content, %				
	PC	SA	S_p	S_f	MS
Lightweight concrete	20.0	3.1	2.2	6.5	46.4
Prototype 1 (heavy concrete)	20.0	3.1	14.1	41.0	0.0
Prototype 2 (heavy concrete)	20.0	3.1	14.1	41.0	0.0

Table 4. Volumetric content of mineral phase components in the studied mixtures at different ratio S_p/S_f

Component	Volume content of S_p/S_f , %				
	0/100	25/75	50/50	75/25	100/0
Quartz flour S_p	0.0	2.2	4.35	6.5	8.7
Fractionated sand S_f	8.7	6.5	4.35	2.2	0.0

The compositions of self-compacting heavy concrete differing in water and plasticizer content were used as prototypes for comparative evaluation of properties of the investigated lightweight concrete: prototype 1 — $W/C = 0.5$, $C_{pl} = 1.4$ %; prototype 2 — $W/C = 0.45$, $C_{pl} = 1.2$ %. The ratio of components in the investigated concrete mixtures was established in accordance with Table 3.

The investigated composition of lightweight concrete includes a mineral phase of different dispersity — quartz sand: fractionated and fine (flour). Varying the ratio of fine and fractionated particles (Table 4) of sand allows us to trace the contribution of components of identical mineral composition to the distribution of water in the disperse system at a constant flow rate of all components of lightweight concrete (Table 3), $W/C = 0.5$ and $C_{pl} = 1$. The total volume content of quartz components in the lightweight concrete mix is $S_p + S_f = \text{const} = 8.7$ %.

To investigate the rheological properties of lightweight self-compacting concrete (LSCC), the effects were considered within a two-factor composite plan of experiments, where X_1 — water quantity (W/C) and X_2 — plasticizer concentration (C_{pl} % of cement mass) were selected as the varying factors. The basic levels were values of 0.5 and 1.4 and the variation intervals were 0.1 and 0.4 %, respectively.

The method of mathematical planning of the experiment was used to study the properties of the investigated concrete mixtures. The following standard two-factor model was used:

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

The search for the coefficients of the equation allowed us to establish the dependence of quality parameters Y on variable factors (X_1 and X_2), which allows us to significantly reduce the number of experiments.

The study of rheological properties was carried out by viscosity and shear stress of the concrete mixture using a rotary viscometer MCR 101 (Fig. 1). The technique

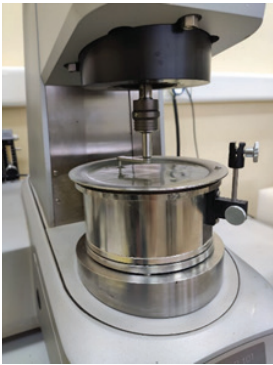


Fig. 1. Determination of viscosity and shear stress of concrete mixture on hollow microspheres using MCR 101 rotational viscometer

of rheological parameters determination consists in measuring the moment of resistance of the tested concrete mixture to the movement of the measuring system immersed in the mixture. The measuring system is a metal ball with a diameter of eight mm, making an orbital movement with a linear increment of shear rate to the value of 1 s^{-1} for 60 seconds.

The tests were carried out according to the following algorithm: 1) homogenization of dry components of the mixture; 2) addition of water with dissolved plasticizer; 3) mixing of the concrete mixture according to GOST 30744; 4) filling of the viscometer test bowl, positioning of the measuring system to the zero position, stabilization of the system (duration nine min); 5) measurement. The total test time of the concrete mixture after its preparation is 22 ± 2 min. Measurements were performed in two repetitions with an intermediate homogenization step. After the test, the concrete mixture was re-homogenized and placed in uncompacted moulds to make $40 \times 40 \times 160$ mm standard prism specimens.

RESEARCH RESULTS

Rheological curves describing the dependence of viscosity and shear stress on shear rate were obtained for each composition according to the above plan of experiments (Fig. 2).

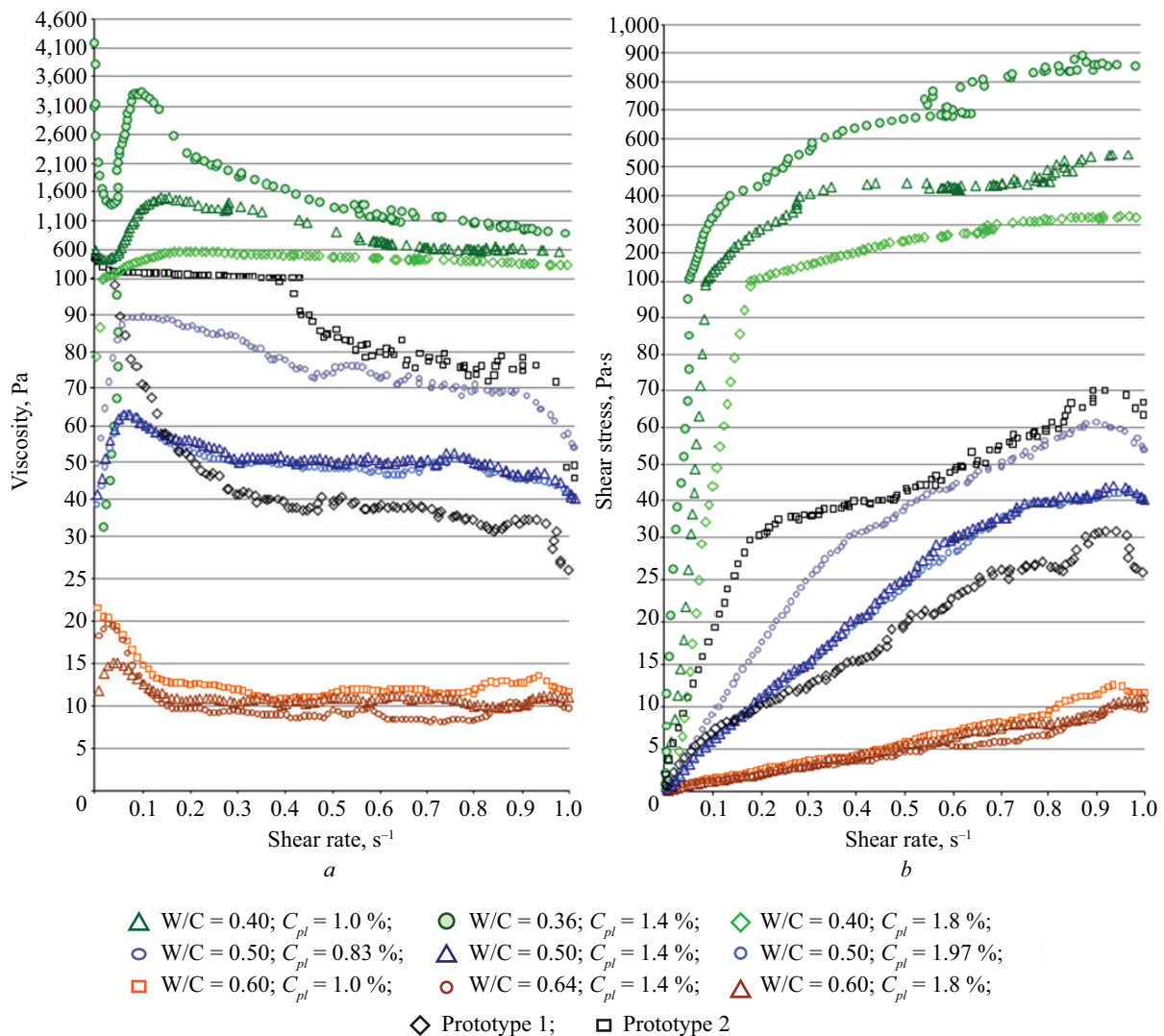


Fig. 2. Graph of viscosity (a) and shear stress (b) versus shear rate for lightweight concrete mixtures on hollow microspheres and heavyweight concrete mixtures at varying W/C ratio and plasticizer concentration

In accordance with the multipoint experiment plan, the obtained rheological curve plots can be grouped according to the viscosity ranges in which the change occurs with increasing shear rate. The highest viscosity ($\mu > 100 \text{ Pa}\cdot\text{s}$) has compositions with $W/C < 0.4$, at $W/C = 0.5$ the viscosity varies in the range from 40 to 90 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ and the third group is formed by compositions whose viscosity does not exceed 25 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ (Fig. 2, a).

Compositions of the first group ($W/C < 0.4$) are characterized by the highest density with liquefaction with increasing shear rate up to viscosity 400–800 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ (Fig. 2, a). For mixtures with $W/C = 0.36$ and $C_{pl} = 1.4 \%$ and $W/C = 0.4$ and $C_{pl} = 1.0 \%$, intense liquefaction is observed at initial shear rates — viscosity decreases intensively, followed by a comparable increase. Such behaviour of the dispersed system is associated with the formation of structural elements under the action of shear force and their subsequent compaction due to the reduction of the distance between the grains of the dispersed phase. After reaching the shear rate of more than $0.1\text{--}0.15 \text{ s}^{-1}$ viscosity decreases, which is

associated with overcoming the threshold of resistance to flow. A larger volume of the mixture acquires motion at this point in time. Also for these formulations, areas of opposite change in viscosity and shear stress can be seen with increasing shear rate at values around 0.3 and 0.6 s^{-1} . This is explained by the violation of continuity due to the creation of voids inside the volume of the mixture, formed due to its high density and, as a consequence, its low ability to fill the free space, which is formed by the movement of the measuring system (“ball” of the viscometer).

The increase in viscosity and shear stress with decreasing W/C ratio is regular, irrespective of the plasticizer concentration. A similar pattern can be observed for formulations with varying C_{pl} , an increase in which leads to a decrease in mixture density, expressed by a lower value of viscosity and shear stress. At the same time, a limit for the concentration of plasticizer is observed, when its amount ceases to influence the investigated rheological parameters. Thus, on formulations with W/C ratio 0.5 it can be seen that changing

the concentration of additive more than $C_{pl} > 1.4\%$ is not reflected in the graphs of viscosity and shear stress dependence on shear rate (Fig. 2, *b*). That is, it is no longer possible to change the water distribution in the system by increasing the amount of plasticizer. Comparison of graphs for concrete mixtures with $W/C = 0.5$ and $C_{pl} = 1.4\%$ but different densities shows that the composition without hollow microspheres (prototype 1) has lower viscosity and shear stress, and is characterized by their uniform change, which indicates better fluidity and cohesion of the system. This may be due to the influence of the light dispersed phase (hollow microspheres), which has a smaller size and density compared to the silica sand being replaced. Thus, the fine particles of the lightweight aggregate require more water and the flow intensity decreases in proportion to the gravitational effect, which is density dependent. However, the composition of heavy concrete with the specified ratio of W/C and C_{pl} is prone to water separation, indicating excess water. Reducing the value of the varying factors to $W/C = 0.45$ and $C_{pl} = 1.2\%$ allowed the prototype of a homogeneous heavy concrete mix to be obtained. Obviously, the viscosity and shear stress of such a composition are higher and can act as indicative ranges for obtaining a homogeneous mixture.

The group of concrete mixtures with viscosity less than $25 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ is formed by compositions with $W/C = 0.6$. The plots of viscosity and shear stress have no discernible differences when the plasticizer concentration is varied.

A comparative analysis of the obtained rheological curves of shear stress versus shear rate (Fig. 2, *b*) can be performed using the Ostwald de Waele equation:

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

where τ — shear stress; k — consistency index; $\dot{\gamma}$ — shear rate; n — index characterizing the type of flow ($n < 1$ — pseudoplastic flow, $n > 1$ — dilatant flow).

The rheological equations obtained for each composition, according to the experiment plan, were used to establish the regression equations $Y = f(X_1; X_2)$:

$$Y_3 = 47.0 - 390.9 \cdot X_1 - 37.0 \cdot X_2 + 64.6 \cdot X_1 X_2 + 294.3 \cdot X_1^2 + 7.4 \cdot X_2^2;$$

$$Y_4 = 0.966 - 0.077 \cdot X_1 + 0.029 \cdot X_2 - 0.063 \cdot X_1 X_2,$$

where Y_3 is the coefficient k from the Ostwald de Waele equation; Y_4 is the coefficient n from the Ostwald de Waele equation.

The analysis of the obtained equations shows that the density coefficient k has a more significant change from varying the W/C ratio than the additive concentration. At the same time, both of these factors contribute to the reduction of the value of this criterion. Note the positive sign of the coefficients B_1 , B_{11} and B_{22} of equation Y_3 . This indicates a change in the nature of both the mutual influence of X_1 and X_2 , and a significant increase in their value. That is, both excessive amount of water and plasticizer and their mutual influence leads to increase

in the density of concrete mix. This can be explained by the violation of homogeneity of dispersed systems, when exceeding the threshold amount of varying factors leads to a violation of the water balance. In such a case, water separation is observed and, as a consequence, stratification of the mixture, which may be due to a decrease in the thickness of the water layer and an increase in friction between solid particles.

The equation Y_4 demonstrates the value of the coefficient $n < 1$ at values of the varying factors corresponding to the main levels of variation ($B_0 = 0.966$). That is, such a dispersed system is characterized by pseudoplastic flow, where the concrete mixture starts to flow at minimum values of shear stresses, and as the shear rate increases, the shear stress changes with a damped intensity. Reinforcing this rheological behaviour is the W/C ratio and its combined effect with plasticizer, as indicated by the “-” sign in front of the coefficients B_1 and B_{12} . At the same time, the coefficients of the equation reflecting the influence of the studied factors show the possibility of changing the criterion Y_4 in the region $n > 1$. That is, the character of the concrete mixture flow depending on the value of W/C ratio and plasticizer concentration can change to dilatant. In such a system, the cement-mineral batter forms a layer between the dispersed phase particles, contributing to friction reduction, and with increasing shear rate, the shear stress changes with increasing intensity. As can be seen from the equation $Y_4 = f(X_1; X_2)$, the key factor contributing to the desire for this behaviour of the studied disperse system is the concentration of plasticizer (coefficient B_2).

Thus, the obtained models show the complex nature of the influence of the investigated factors on the rheology of lightweight concrete mixtures, which requires complex optimization by antagonist indicators. In this case, it is reasonable to consider self-compacting fine-grained heavy concrete as a target analogue for the nature of the flow of mixtures. Since the flow of mixtures is determined by the peculiarities of water distribution (with other equal formulation conditions), in addition to its quantity, the most important factor is the total surface area of dry components. The role of dispersibility in controlling the rheological properties of the investigated concrete mixtures is demonstrated in Fig. 3 and Table 5.

In Fig. 3, there is a regular increase in the densification of the concrete mixture with increasing proportion of silica flour, which is reflected in proportionally higher values of shear stress. This is also evident from the change in the coefficient k in the Ostwald de Waele equations obtained for each of the curves. It can be seen that replacing the fraction of fractionated sand with flour from 100 to 0 % contributes to an increase in the densification factor by almost three times, from 35.4 to 102.9. The specified range is explained by the expenditure of water on wetting a larger total surface area of the quartz part. The change in the value of the coef-

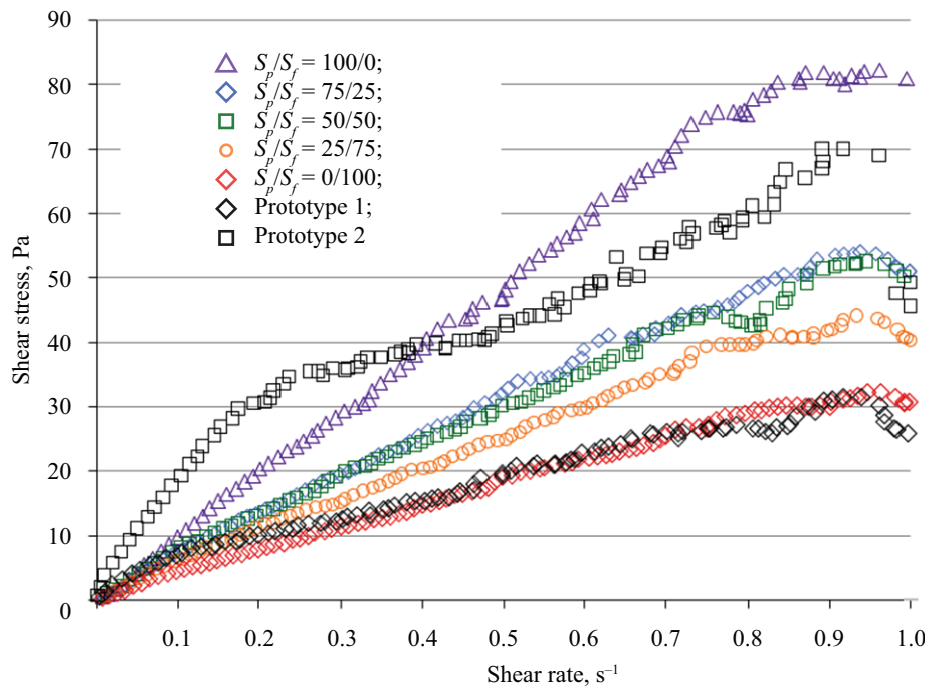


Fig. 3. Rheological flow curves of light concrete mixtures with varying fractional sand to silica flour ratio ($W/C = 0.5$ and $C_{pl} = 1.4 \%$) and heavy concrete mixtures

Table 5. Parameters of the Ostwald de Waele equations describing the rheological flow curves of lightweight concrete mixtures with varying the ratio of fractional sand and silica flour

Coefficients equations Ostwald de Waele	S_p/S_f					Prototype 1	Prototype 2
	0/100	25/75	50/50	75/ 25	100/0		
k	35.4	49.9	57.7	62.0	102.9	31.2	77.7
n	0.94	0.97	0.94	0.97	1.07	0.68	0.63

efficient n indicates a change in the character of flow from pseudoplastic ($n < 1$) to dilatant ($n > 1$) with an increase in the proportion of the fine component S_p , which is explained by the replacement of quartz sand, which is a dispersed phase, with quartz flour — a component of the cement-mineral dough.

CONCLUSION AND DISCUSSION

The results obtained allow us to formulate the following conclusions:

- evaluation of the flow rheology of the investigated mixtures using the coefficients of the Ostwald de Waele equation shows that the W/C ratio is a more significant factor on the concrete mixture density k than the plasticizer concentration. At the same time, there is a regular decrease in the density of the investigated disperse systems with increasing both W/C and C_{pl} ;

- the obtained regression equations for the index n in the Ostwald de Waele equation demonstrate the possibility of changing the character of mixtures flow from pseudoplastic ($n < 1$) to dilatant ($n > 1$) when varying the studied factors;
- replacing the fraction of fractionated sand with flour from 100 to 0 % increases the density almost three times, which is naturally explained by the larger total surface area of the quartz part in the mixture.

The prospect of the topic development is to establish the influence of the investigated factors on the homogeneity of mixtures and strength properties of hardened concrete, search and establishment of parameters and boundary values of delamination after external influence on the concrete mixture before moulding process.

REFERENCES

1. 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

2. Mandal R., Panda S.K., Nayak S. Rheology of con-

crete: critical review, recent advancements, and future perspectives. *Construction and Building Materials*. 2023; 392:132007. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132007

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

4. Fedjuk 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 the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2018; 7:77-85. DOI: 10.12737/article_5b4f02bf93df52.30110991. EDN XVLQJV. (rus.).

5. Mozgalev K.M., Golovnev S.G. Self-sealing concretes: application possibilities and properties. *Akademičeskij vestnik UralNIIProekt RAASN*. 2011; 4:55-60. EDN ONJNAZ. (rus.).

6. Sumin A.S. Lightweight self-sealing concrete and their prospects. *New word in science: development strategies : collection of materials of the V International Scientific and Practical Conference*. 2018; 10-14. EDN OUYFSS. (rus.).

7. Sumin A.S. Lightweight self-sealing concrete — the future of monolithic housing construction. *Science, education, society: trends and prospects of development : collection of materials of the VI International Scientific and Practical Conference*. 2017; 354-358. EDN YZEBVJ. (rus.).

8. Bychkov M.V., Udodov S.A. Light self compacting concrete as an effective constructional material. *Online journal of Science Studies*. 2013; 4(17):41. EDN RSHDSB. (rus.).

9. Adhikary S.K., Ashish D.K., Rudžionis Ž. Expanded glass as light-weight aggregate in concrete — a review. *Journal of Cleaner Production*. 2021; 313:127848. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127848

10. 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

11. 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

12. 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

13. Karim Md.R., Zain Muhammad F.M., Jamil M., Lai Fook C., Islam Md.N. Use of Wastes in Construction Industries as an Energy Saving Approach. *Energy Procedia*. 2011; 12:915-919. DOI: 10.1016/j.egypro.2011.10.120

14. Rafeet A., Vinai R., Soutsos M., Sha W. Effects of slag substitution on physical and mechanical properties of fly ash-based alkali activated binders (AABs). *Cement and Concrete Research*. 2019; 122:118-135. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.05.003

15. Zeyad A.M., Almalki A. Influence of mixing time and superplasticizer dosage on self-consolidating concrete properties. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020; 9(3):6101-6115. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.04.013

16. Inozemtsev A.S., Korolev E.V., Doung T.Q. Structural flow model of plasticized cement-mineral mixtures. *Construction Materials*. 2020; 4-5:90-96. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-90-96. EDN CVBCCH. (rus.).

17. Inozemtsev A.S., Korolev E.V. Conditions for the manifestation of anomaly in the flow of plasticized cement-mineral mixtures. *Industrial and Civil Engineering*. 2021; 12:23-30. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.12.23-30. EDN GMURMO. (rus.).

18. Nemocón S.A.G., Marriaga J.M.L., Suárez J.D.P. Rheological and hardened properties of self-compacting concrete using hollow glass microspheres as a partial replacement of cement. *Construction and Building Materials*. 2022; 342:128012. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128012

19. Patent RU No. 2548303. *High-strength lightweight fiber-reinforced concrete* / Korolev E.V., Inozemtsev A.S.; application No. 2014114357/03 04/11/2014. Publ. 04/20/2015. EDN ZFGSHZ.

20. Inozemtsev A.S., Epikhin S.D. Conditions for the preparation of self-compacting lightweight concrete with hollow microspheres. *Materials*. 2023; 16(23):7288. DOI: 10.3390/ma16237288

Received December 26, 2023.

Adopted in revised form on January 16, 2024.

Approved for publication on January 23, 2024.

B I O N O T E S : **Sergey D. Epikhin** — postgraduate student, lecturer of the Department of Building Materials Science; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; sergep97@mail.ru;

Aleksandr S. Inozemtsev — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction 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; InozemcevAS@mgsu.ru.

Contribution of the authors:

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

Aleksandr S. Inozemtsev — 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.