

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 691:666.952.1

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.9.1343-1353

Сравнительный анализ способов оценки реологической эффективности комплексных модификаторов в цементных системах

Валерий Станиславович Лесовик, Даниил Александрович Толыпин,
Наталья Максимовна Толыпина

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова);
г. Белгород, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. На практике в качестве показателей эффективности действия добавок-разжижителей используют стандартные технические характеристики (осадка конуса, диаметр расплыва смеси и др.), по которым сложно судить о реологических свойствах цементных систем. Исследование посвящено анализу соотносительности показателей подвижности с реологическими характеристиками и вопросу регулирования реологических показателей цементных смесей с учетом электроповерхностных явлений.

Материалы и методы. Использовали наполнители (кварц, мрамор) с различными электроповерхностными свойствами ($S_{уд} = 300$ и $600 \text{ м}^2/\text{кг}$); вяжущее: ЦЕМ I 42,5 Н ЗАО «Осколцемент»; пластифицирующие добавки: суперпластификатор Полипласт СП-1, гиперпластификатор Sunbo 2021. Реологические характеристики дисперсий определяли на ротационном вискозиметре Rheotest RN 4.1, подвижность — при помощи мини-конуса. Микроанализ поверхности проводили с использованием РЭМ TESCAN MIRA 3 LM. Удельную поверхность определяли на приборе ПСХ-10а, электрокинетический потенциал поверхности частиц — на оборудовании Zetasizer Nano ZS.

Результаты. Показано, что наибольший разжижающий эффект наблюдается в суспензиях, где преобладающий знак заряда поверхности частиц минеральных наполнителей противоположен знаку заряда функциональной группы анионных пластифицирующих добавок, и наоборот. Выявлено, что вид минерального наполнителя сильнее сказывается на показателях подвижности, чем на реологических характеристиках. Установлена взаимосвязь между пластической вязкостью и подвижностью (РК). На основе анализа полученных реологических данных и подвижности выявлены области течения цементных дисперсий.

Выводы. Применение тонкодисперсных порошков положительно влияет на текучесть цементных дисперсий, мраморный наполнитель более эффективен, чем кварцевый. В области умеренного разжижения дисперсий (РК = 60–170 мм) расплав конуса аутентичен реологическим показателям, а крайние области плохо идентифицируются. Практическое применение результатов исследований позволит повысить эффективность использования супер- и гиперпластификаторов и упростить оценку реологического режима течения дисперсий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цементные системы, минеральный наполнитель, пластификатор, предел текучести, пластическая вязкость, реологические свойства, расплав конуса

Благодарности. Работа выполнена в рамках реализации гранта Российского научного фонда (проект № 25-19-00866).

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Лесовик В.С., Толыпин Д.А., Толыпина Н.М. Сравнительный анализ способов оценки реологической эффективности комплексных модификаторов в цементных системах // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 9. С. 1343–1353. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.9.1343-1353

Автор, ответственный за переписку: Даниил Александрович Толыпин, tolypin.daniil@yandex.ru.

Comparative analysis of methods for assessing the rheological efficiency of complex modifiers in cement systems

Valeriy S. Lesovik, Daniil A. Tolypin, Natalia M. Tolypina

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov);
Belgorod, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. In practice, standard technical characteristics (such as cone slump, mixture spread diameter, etc.) are used as indicators of the efficiency of plasticizing additives. However, these characteristics make it difficult to judge the rheological properties of cement systems. This paper is devoted to analyzing the correlation between mobility indicators and rheological characteristics, as well as the regulation of rheological parameters of cement mixtures considering electro-surface phenomena.

Materials and methods. Fine fillers (quartz, marble) with different electro-surface properties ($S_{sp} = 300$ and $600 \text{ m}^2/\text{kg}$) were used. The binder was CEM I 42.5 N produced by CJSC “Oskoltsement”; chemical additives included the superplasticizer

Polyplast SP-1 and the superplasticizer Sunbo 2021. Rheological characteristics of the dispersions were determined using a Rheotest RN 4.1 rotational viscometer, and mobility was assessed with a mini-cone. Surface microanalysis was conducted using a TESCAN MIRA 3 LM scanning electron microscope. Specific surface area was measured with a PSKh-10a device, and the electrokinetic potential of particle surfaces was measured using a Zetasizer Nano ZS.

Results. It was shown that the greatest thinning effect was observed in suspensions where the predominant surface charge of mineral filler particles was opposite to the charge of the functional group of anionic plasticizing additives, and vice versa. It was revealed that the type of mineral filler had a stronger impact on mobility indicators than on rheological characteristics. A correlation between plastic viscosity and mobility (spread diameter) was established. Based on the analysis of the obtained rheological data and mobility, flow regions of cement dispersions were identified.

Conclusions. The use of fine powders positively influences the flowability of cement dispersions, with marble filler being more effective than quartz. In the region of moderate dispersion thinning (spread diameter = 60–170 mm), the cone spread is consistent with the rheological properties of cement systems. Practical application of the research results presented in this paper will enhance the efficiency of superplasticizers and simplify the assessment of the rheological flow regime of dispersions.

KEYWORDS: cement systems, mineral filler, plasticizer, yield stress, plastic viscosity, rheological properties, cone spread

Acknowledgments. This work was supported by a grant from the Russian Science Foundation (project No. 25-19-00866).

FOR CITATION: Lesovik V.S., Tolypin D.A., Tolypina N.M. Comparative analysis of methods for assessing the rheological efficiency of complex modifiers in cement systems. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(9):1343-1353. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.9.1343-1353 (rus.).

Corresponding author: Daniil A. Tolypin, tolypin.daniil@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Анионные поверхностно-активные вещества (ПАВ) адсорбируются на положительно заряженных активных центрах гидратных соединений, что сопровождается разрушением флоккул с высвобождением иммобилизированной воды и увеличением подвижности цементного теста. У применяемых в настоящее время анионоактивных пластифицирующих добавок знак заряда функциональной группы и активных центров на поверхности традиционных наполнителей и заполнителей (кварц, гранит, диорит, кварцитопесчаник и др.) совпадают. Так как анионные ПАВ не адсорбируются на поверхностях с преимущественно отрицательно заряженными активными центрами, то наполнители и заполнители бетонов из кислых горных пород являются инертными компонентами с точки зрения разжижения [1, 2]. В этой связи бетонные смеси с низким содержанием вяжущего плохо пластифицируются современными анионными добавками, что может привести к большой технологическим осложнениям и быть возможной причиной плохой укладываемости [3–5]. Для того чтобы вовлечь не только вяжущее, но и наполнитель бетонной смеси в процесс взаимодействия с функциональной группой добавок-разжижителей, необходимо, чтобы поверхностные заряды дисперсных минеральных компонентов бетонной смеси и функциональных групп пластифицирующих добавок были противоположны по знаку [6–8]. Более предпочтительными будут минеральные наполнители, которые имеют преимущественно положительный знак заряда поверхностных активных центров. К ним относятся минеральные модификаторы на основе карбонатных горных пород: известняки, доломиты, мраморы.

На практике в качестве показателей эффективности действия добавок-разжижителей используют стандартные технические характеристики, такие

как осадка конуса, диаметр расплыва смеси и др. Однако, используя эти способы, сложно судить о реологических свойствах цементных систем, которые отражают механическое поведение под внешними воздействиями (предельное напряжение сдвига, эффективная вязкость) [9–12]. Отличительное свойство — трансформация реологических показателей с ростом или уменьшением скорости сдвига. Применяя реологические показатели, характеризующие структурно-механические свойства цементных систем, можно проводить аутентичный выбор химических добавок-модификаторов, обеспечивающих стабильность структуры смесей при транспортировании и одновременно требуемую текучесть при формировании [13–17]. Вопросу о взаимосвязи данных подвижности и реологических показателей сегодня не уделяется должного внимания, и в технической литературе такого рода сведения достаточно ограничены [2].

Наиболее эффективным способом регулирования реологических свойств смесей на цементной основе служит применение супер- и гиперпластификаторов, эффективно снижающих предел текучести и вязкость до минимального уровня, вплоть до самоуплотнения и исключения необходимости механических воздействий [6, 9–11]. Несмотря на то что дисперсные минеральные добавки все шире применяются в качестве компонентов строительных материалов [9, 18–20], вопрос регулирования реологических характеристик цементных смесей при помощи комплексного действия минеральных и органических добавок с учетом электроповерхностных явлений исследован недостаточно. Работа посвящена восполнению пробелов в области оценки реологических показателей модифицированных цементных систем.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Тонкодисперсные наполнители с различными электроповерхностными свойствами получали

помолом в лабораторной мельнице до удельной поверхности $S_{уд} = 300$ и $600 \text{ м}^2/\text{кг}$. Использовали кварцевый песок ООО «Пулмаркет» ($\text{SiO}_2 = 95 \%$, $S_{уд} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$) и ООО «Формматериалы» ($\text{SiO}_2 = 99,3 \%$, $S_{уд} = 600 \text{ м}^2/\text{кг}$), мрамор Еленинского месторождения ($S_{уд} = 300$ и $600 \text{ м}^2/\text{кг}$). Преобладающий заряд поверхности кварцевого песка — $31,6 \text{ мВ}$ (ООО «Пулмаркет», $S_{уд} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$) и $38,9 \text{ мВ}$ (ООО «Формматериалы», $S_{уд} = 600 \text{ м}^2/\text{кг}$), мрамора + $19,3 \text{ мВ}$. Присутствуют незначительные количества активных центров противоположного знака у частиц всех составов. В качестве вяжущего использовали ЦЕМ I 42,5 Н ЗАО «Осколцемент» ($\tau_{н.схв} = 230 \text{ мин}$; $\text{НГ} = 26 \%$, $\text{C}_3\text{S} = 61,6 \%$, $\text{C}_2\text{S} = 14,2 \%$, $\text{C}_3\text{A} = 6,8 \%$, $\text{C}_4\text{AF} = 3,7 \%$). Химические добавки: суперпластификатор (СП) нафталинформальдегидного типа Полипласт СП-1 (ТУ 5870-005-58042865-05), гиперпластификатор (ГП) на поликарбоксилатной основе Sunbo 2021 (Suzhou Sunbo Chemical Building Materials Co., Ltd). Пластифицирующие добавки вводили с водой затворения в цементные дисперсии (ПЦ:наполнитель = 70:30).

Для исследований использовали усеченный мини-конус высотой 60 мм с диаметром нижнего отверстия 40 мм, верхнего — 20 мм. Контрольное значение распыла мини-конуса исследованных суспензий ($\text{В/Т} = 0,3$) без гипер- и суперпластификатора соответствовало 45 мм. При введении модификаторов-разжижителей СП-1 (0,4 %) и Sunbo 2021 (0,4 %) в дисперсии различного состава фик-

сировались изменения подвижности по диаметру распыла на гладкой стеклянной поверхности. Реологические характеристики цементных дисперсий изучали при помощи ротационного вискозиметра Rheotest RN 4.1. Микроанализ поверхности порошков с помощью картирования проводили с использованием растрового электронного микроскопа TESCAN MIRA 3 LM. Удельную поверхность определяли на приборе ПСХ-10а (метод газопроницаемости), измерения электрокинетического потенциала поверхности частиц — на оборудовании Zetasizer Nano ZS.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для определения текучести дисперсий различного состава и оценки эффективности действия добавок-разжижителей использовали метод мини-конуса, широко применяемый отечественными и зарубежными специалистами. Мраморные дисперсии демонстрировали наибольшую способность разжижаться под воздействием анионоактивных супер- и гиперпластификатора (рис. 1, 2). Это обусловлено тем, что на поверхности частиц мрамора с преимущественно положительно заряженными активными центрами идет интенсивная адсорбция макромолекул добавок пластифицирующего действия за счет электростатического взаимодействия с отрицательно заряженными функциональными группами, благодаря чему наблюдается высокий разжижающий эффект. С увеличением удельной поверхности

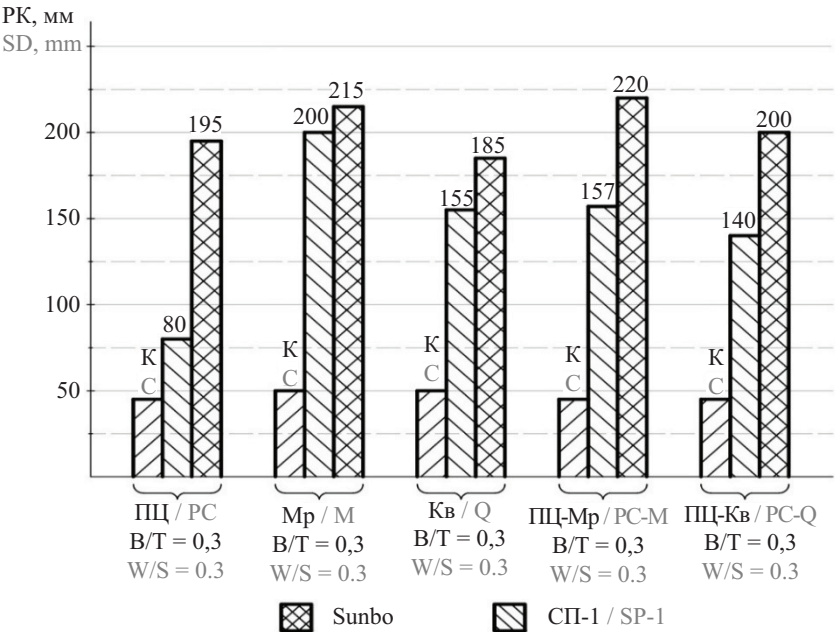


Рис. 1. Сравнительная подвижность (PK) дисперсий различного состава с добавками разжижителями Sunbo (0,4 %) и СП-1 (0,4 %): ПЦ — портландцемент; Мр — мрамор ($S_{уд} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$); Кв — кварц ($S_{уд} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$); ПЦ-Мр — цементно-мраморная дисперсия 70:30; ПЦ-Кв — цементно-кварцевая дисперсия 70:30; К — контрольный состав без СП

Fig. 1. Comparative mobility (spread diameter) of dispersions of different compositions with thinning additives Sunbo (0,4 %) and SP-1 (0,4 %): PC — Portland cement; M — marble ($S_{sp} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$); Q — quartz ($S_{sp} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$); PC-M — cement-marble dispersion 70:30; PC-Q — cement-quartz dispersion 70:30; C — control composition without plasticizer

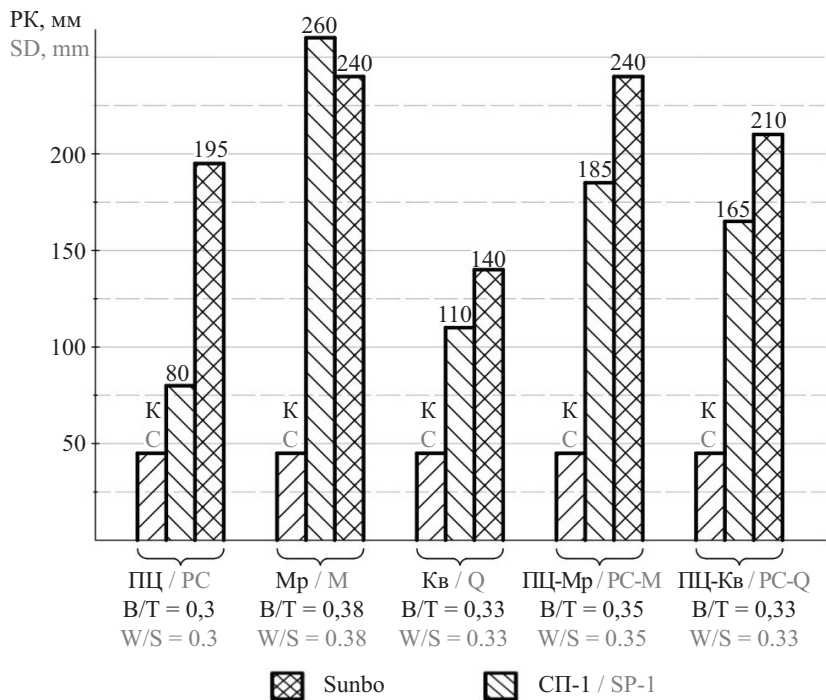


Рис. 2. Сравнительная подвижность (PK) дисперсий различного состава с добавками разжижителями Sunbo (0,4 %) и СП-1 (0,4 %): ПЦ — портландцемент; Мр — мрамор ($S_{уд} = 600 \text{ м}^2/\text{кг}$); Кв — кварц ($S_{уд} = 600 \text{ м}^2/\text{кг}$); ПЦ-Мр — цементно-мраморная дисперсия 70:30; ПЦ-Кв — цементно-кварцевая дисперсия 70:30; К — контрольный состав без СП

Fig. 2. Comparative mobility (spread diameter) of dispersions of different compositions with thinning additives Sunbo (0.4 %) and SP-1 (0.4 %): PC — Portland cement; M — marble ($S_{sp} = 600 \text{ м}^2/\text{кг}$); Q — quartz ($S_{sp} = 600 \text{ м}^2/\text{кг}$); PC-M — cement-marble dispersion 70:30; PC-Q — cement-quartz dispersion 70:30; C — control composition without plasticizer

мрамора от 300 до 600 $\text{м}^2/\text{кг}$ подвижность дисперсии увеличилась от 200 до 260 мм с СП-1 (0,4 %) и от 215 до 240 с Sunbo (0,4 %).

Кварцевые дисперсии во всех случаях разжижались слабее, уступая мраморным. Более интенсивное разжижение наблюдалось у кварцевой суспензии с удельной поверхностью кварца 300 $\text{м}^2/\text{кг}$, чем с $S_{уд} = 600 \text{ м}^2/\text{кг}$. Причина такого расхождения заключалась в том, что кварцевый наполнитель с $S_{уд} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$, полученный измельчением природного кварцевого песка, содержал образованные в процессе литогенеза примеси в виде дисперсных пленок соединений алюминия, которые являются источником положительно заряженных центров (рис. 3). В результате происходит повышение адсорбции макромолекул анионоактивных гипер- и суперпластификатора на поверхности частиц с положительно заряженными активными центрами и разжижение усиливается.

В случае, когда использовался тонкодисперсный кварц с высокой степенью чистоты поверхности ($S_{уд} = 600 \text{ м}^2/\text{кг}$), наблюдалось слабое разжижение кварцевых суспензий (рис. 2). Это обусловлено тем, что у чистого кварца более высокий электроотрицательный заряд поверхности, в результате адсорбция анионоактивных заряженных ионов незначительна, а разжижающая способность супер- и гипер-пластификатора резко снижается. Однако, несмотря на преобладающее

количество отрицательно заряженных центров на поверхности кварцевых частиц, также образуется и некоторое количество положительно заряженных центров, число которых возрастает по мере измельчения кварцевого порошка, что обеспечивает несущественную адсорбцию макромолекул пластифицирующих добавок на частицах кварца и слабое разжижение.

У смешанных цементно-мраморных и цементно-кварцевых суспензий (70:30) разница по подвижности нивелируется. Электроповерхностные свойства наполнителей оказывают меньшее влияние на разжижение смешанных цементных дисперсий, чем чисто минеральных, так как сказывается преобладающее влияние гидроалюминатных частиц портландцемента, имеющих положительный заряд поверхности. При этом электроповерхностные свойства наполнителей в большой степени будут влиять на стабильность разжижающего действия во времени из-за возможных реакций гетерокоагуляции с заряженными частицами гидратных фаз. Следует отметить, что применение тонкодисперсных наполнителей, менее склонных к агрегированию, положительно влияет на подвижность цементного теста. У смешанных цементных дисперсий тенденция к флокуляции выражена слабее, чем в чистом цементном тесте, где сказывается сильное притяжение частиц силикатов к алюминатам, в том числе с проявлением химических связей. В этой связи смешан-

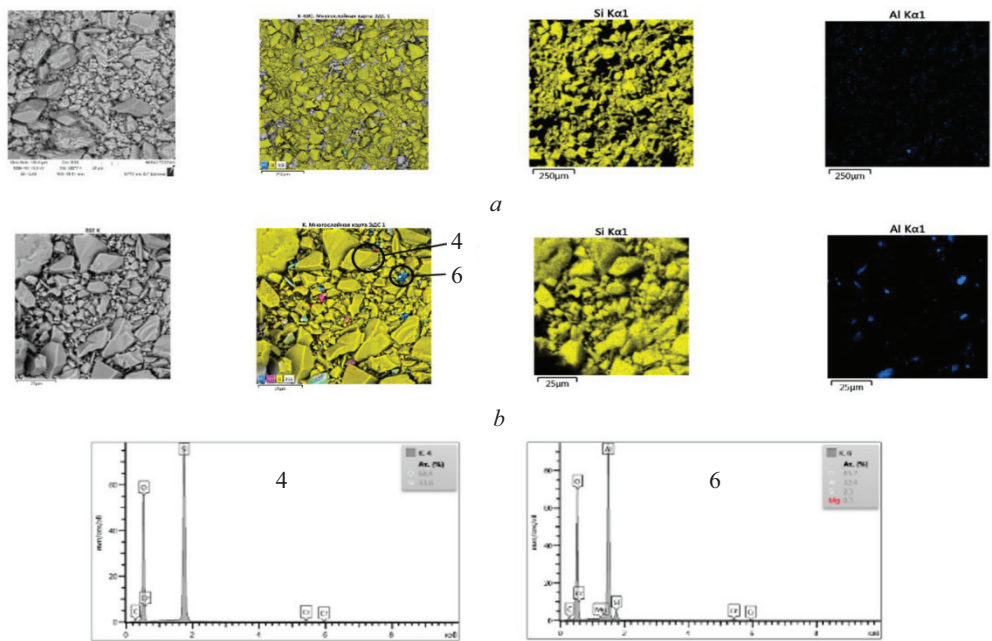


Рис. 3. Микроанализ поверхности частиц кварца с помощью картирования: *a* — $S_{уд} = 600 \text{ м}^2/\text{кг}$; *b* — $S_{уд} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$
Fig. 3. Surface microanalysis of quartz particles using mapping: *a* — $S_{sp} = 600 \text{ м}^2/\text{кг}$; *b* — $S_{sp} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$

ные цементно-мраморные и цементно-кварцевые дисперсии, модифицированные пластифицирующими добавками, сильнее разжижаются, чем чисто цементные. Применение мраморного наполнителя более эффективно, чем кварцевого при одинаковой степени измельчения.

Большое практическое значение имеет изучение вопроса о сопоставимости результатов измерения

расплава конуса с данными вискозиметрических исследований. Реологические показатели цементных дисперсий, модифицированных минеральными и пластифицирующими добавками, демонстрируют эффективное снижение пластической вязкости и напряжения сдвига (рис. 4), о чем свидетельствует снижение степени нелинейности реограмм и приближение структурного режима течения диспер-

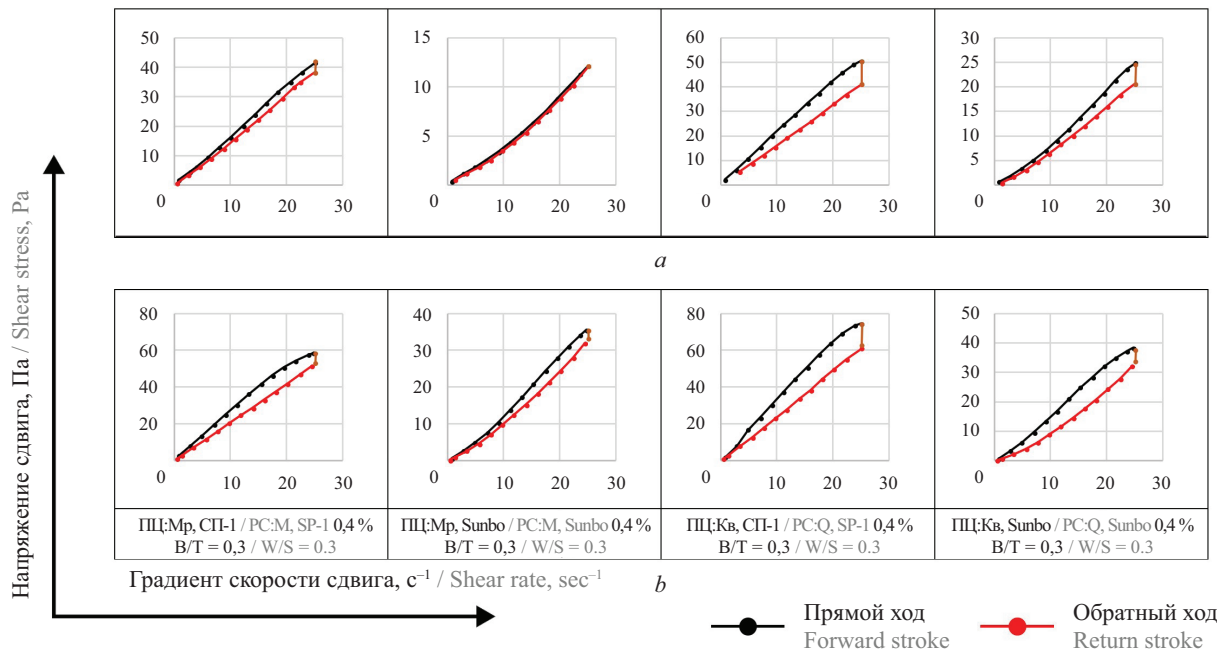


Рис. 4. Реограммы цементных дисперсий с минеральными и органическими модификаторами: *a* — $S_{уд} = 600 \text{ м}^2/\text{кг}$; *b* — $S_{уд} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$
Fig. 4. Rheograms of cement dispersions with mineral and organic modifiers: *a* — $S_{sp} = 600 \text{ м}^2/\text{кг}$; *b* — $S_{sp} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$

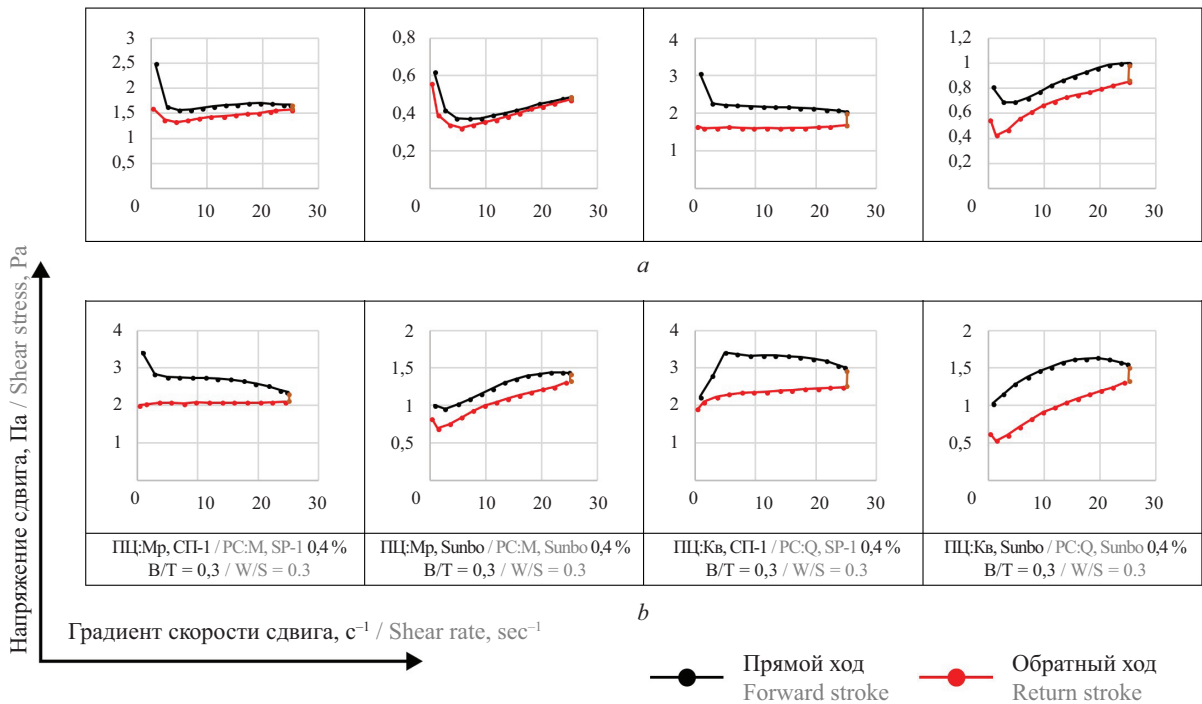


Рис. 5. Вязкость цементных дисперсий с минеральными и органическими модификаторами: $a — S_{уд} = 600 \text{ м}^2/\text{кг}$; $b — S_{уд} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$

Fig. 5. Viscosity of cement dispersions with mineral and organic modifiers: $a — S_{sp} = 600 \text{ м}^2/\text{кг}$; $b — S_{sp} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$

сий к ньютоновскому. Низкие значения пределов текучести смешанных цементных суспензий отражают наличие участков с упругой деформацией при очень малых интервалах напряжений сдвига. Цементно-мраморные дисперсии характеризуются более сильной нелинейностью реограмм при минимальных значениях предела текучести по сравнению с цементно-кварцевыми. Ввод гиперпластификатора Sunbo приводит к резкому снижению тиксотропии по сравнению с модификатором СП-1. Вязкость смешанных цементных дисперсий с СП-1 приблизительно в 2–3 раза больше, чем с Sunbo (рис. 5). Выделяется реограмма цементно-мраморной дисперсии ($S_{уд} = 600 \text{ м}^2/\text{кг}$) с гиперпластификатором Sunbo, которая отражает проявление тиксотабильных свойств, когда происходит совпадение скоростей разрушения и восстановления структуры, при этом наблюдается совмещение экспериментальных точек на прямой и обратной ветвях реологической кривой (рис. 4). Остальные реограммы демонстрируют слабо выраженные тиксотропные свойства, сужение петли гистерезиса свидетельствует о приближении системы к тиксотабильности и усилении влияния коагуляционных связей.

Вязкость систем с поликарбоксилатной добавкой Sunbo менее чувствительна к виду применяемого минерального наполнителя, чем с суперпластификатором СП-1. Значения пластической вязкости смешанных цементных суспензий с добавкой суперпластификатора СП-1 незначительно снижаются с ростом скорости сдвига (рис. 5), а с гиперпла-

стификатором Sunbo слабо повышаются, проявляя дилатантные свойства. Характерно, что цементно-мраморная дисперсия с наибольшим распылом конуса (240 мм) отличается наименьшими значениями предельного напряжения сдвига — 0,45 Па и пластической вязкости 0,6 Па·с (рис. 2, 4, 5). При этом у цементно-кварцевой дисперсии с минимальной подвижностью (РК = 140 мм, СП-1) отмечается наибольшая вязкость — 3,1 Па·с.

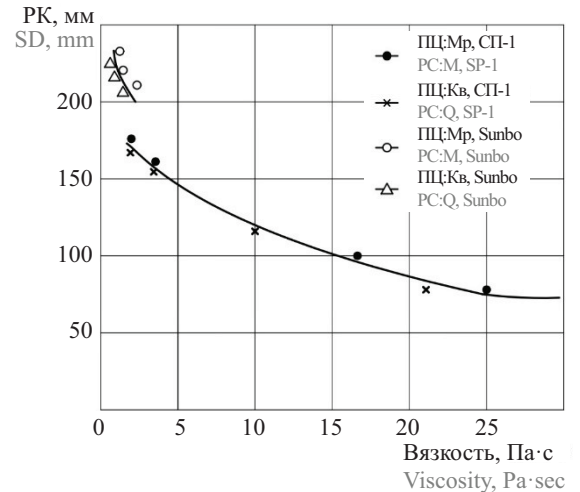


Рис. 6. Распыл мини-конуса цементных суспензий в зависимости от пластической вязкости

Fig. 6. Spread of the mini-cone of cement suspensions depending on plastic viscosity

Анализ и сопоставление реологических свойств смешанных дисперсий с их подвижностью позволили выявить определенную взаимосвязь между ними. На основе приведенных экспериментальных данных и опубликованных ранее авторами статьи установлено, что в области пластической вязкости смешанных цементных суспензий 2–25 Па·с наблюдается обратно пропорциональная зависимость между пластической вязкостью и распылом конуса (рис. 6). В области низких значений вязкости менее 1–2 Па·с зависимость подвижности (РК) от вязкости мало зависела от последней, а с повышением пластической вязкости более 25 Па·с распыл конуса перестает реагировать на ее изменения. Таким образом, определение текучести дисперсий по распылу мини-конуса не дает полной картины разжижения. Взаимосвязь между пластической вязкостью и расте-

каемостью при использовании мини-конуса хорошо коррелируется только в области умеренного разжижения, а крайние области плохо идентифицируются. Сопоставление реологических данных и подвижности позволило идентифицировать реологические области течения с кривыми подвижности (рис. 7). Область вязкопластичного (пластичного) течения дисперсий находится в диапазоне значений подвижности (РК = 40–150 мм) и вязкости 10–25 Па·с. Область линейного течения наблюдается при значениях РК > 155 мм и вязкости менее 5–7 Па·с (рис. 7, b). При вводе гиперпластификатора Sunbo (0,2–0,6 %) пластическая вязкость падает практически в 95–230 раз, а при вводе СП-1 (0,4–0,6 %) в 58–100 раз и находится в пределах 0,86–3,44 Па·с. В этом случае течение идет с минимальной вязкостью и практически разрушенной структурой с элементами слабо-

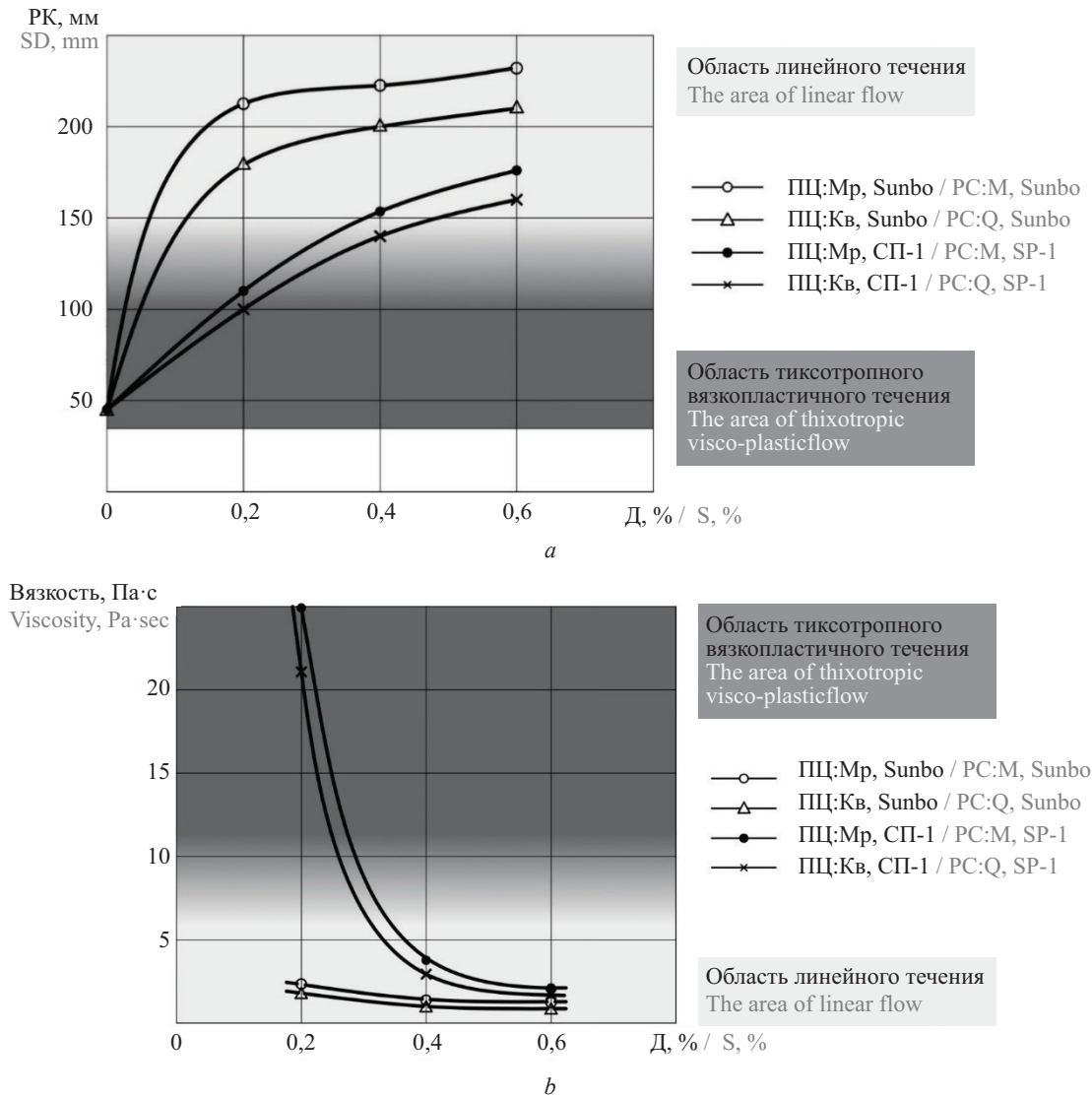


Рис. 7. Области течения цементных суспензий с добавками-разжижителями в зависимости от: *a* — подвижности (РК); *b* — пластической вязкости

Fig. 7. Flow regions of cement suspensions with thinning additives depending on: *a* — mobility (spread diameter); *b* — plastic viscosity

выраженного тиксотропного течения, это область линейного течения. При значениях пластической вязкости около 10 Па·с и выше наблюдается область вязкопластичного течения. Дальнейшие реологические исследования подтвердили достоверность установленных областей течения. Это позволяет, используя более доступный метод определения подвижности при помощи мини-конуса, косвенно судить о реологических характеристиках цементных дисперсий с пластифицирующими добавками, измерение которых более трудоемко и требует специального сложного оборудования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Показано, что эффективность разжижения смещенных цементных суспензий при помощи анион-активных супер- и гиперпластификаторов зависит от электроповерхностных свойств частиц минеральных модификаторов. Наибольший разжижающий эффект наблюдается в суспензиях на основе минеральных наполнителей с положительно заряженными частицами. Если преобладающий знак заряда поверхности частиц порошка отрицательный, т.е. совпадает со знаком заряда функциональной группы суперпластификатора, это приводит к снижению разжижения. Применение тонкодисперсных порошков положительно влияет на текучесть цементных дисперсий, мраморный наполнитель более эффективен, чем кварцевый. Вид минерального наполнителя сильнее сказывается на показателях подвижности, чем на реологических характеристиках. Это обусловлено тем, что в первом случае дефлокуляция обеспечивается действием только добавок-разжижителей, а при определении реологических показателей цементная дисперсия подвергается также и механическому воздействию, что вызывает интенсивное разрушение флоккул.

Дисперсии, полученные помолотом обычного кварцевого песка, могут эффективно разжижаться несмотря на преобладающее количество отрицательно заряженных центров на поверхности кварца. Причиной является наличие примесей в виде пленок оксидов и гидроксидов алюминия (железа) в квар-

цевых песках, вызывающих смещение дзета-потенциала в положительную область. Дисперсии тонкодисперсного чистого кварца без примесей слабо разжижаются, так как адсорбция анион-активных заряженных ионов на отрицательно заряженных активных центрах частиц кварца происходит слабее, в результате разжижающая способность анион-активных супер- и гиперпластификаторов падает.

Взаимосвязь между пластической вязкостью и РК зависит от степени разжижения, которая связана с составом дисперсий и дозировками пластифицирующих добавок. В области умеренного разжижения дисперсий (РК = 60–170 мм) при небольших дозировках пластифицирующих добавок расплыв конуса аутентичен реологическим свойствам цементных систем. При более высоких показателях текучести с РК = 200–300 мм и более подвижность по расплыву мини-конуса слабее отражает реологические свойства дисперсных систем. При малом разжижении (РК < 60 мм) расплыв конуса и вязкость соотносятся неудовлетворительно. Таким образом, использовать показатель подвижности дисперсии по расплыву мини-конуса рационально для идентификации текучести суспензий с умеренной пластической вязкостью, но нецелесообразно при малой и высокой вязкости.

На основе анализа полученных реологических данных и подвижности установлены области течения цементных дисперсий. Область вязкопластичного (пластичного) течения дисперсий соответствует диапазону значений подвижности (РК = 40–150 мм), что соответствует вязкости 10–25 Па·с. При значениях подвижности РК > 155 мм течение идет с минимальной вязкостью (0,86–3,44 Па·с) и практически разрушенной структурой с элементами слабовыраженного тиксотропного течения — это область линейного течения. Установленная зависимость позволяет при помощи простого доступного метода определения подвижности с использованием мини-конуса получать косвенные сведения о реологических характеристиках цементных дисперсий с пластифицирующими добавками, измерение которых требует специального сложного оборудования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Толыпина Н.М., Толыпин Д.А. Влияние минеральных наполнителей на разжижение цементных суспензий с помощью ПАВ // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2022. № 9. С. 26–33. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-9-26-33. EDN ENFGLL.

2. Рахимбаев Ш.М., Толыпина Н.М., Хахалева Е.Н. Взаимосвязь между пластической вязкостью цементных систем и их реотехнологическими характеристиками // Вестник Сибирского государствен-

ного автомобильно-дорожного университета. 2018. Т. 15. № 2 (60). С. 276–282. EDN XSDGCL.

3. Лесовик В.С., Елистраткин М.Ю., Сальникова А.С., Казлитина О.В. К вопросу повышения эффективности высокопрочных самоуплотняющихся бетонов // Региональная архитектура и строительство. 2021. № 1 (46). С. 20–27. EDN DIRJUN.

4. Леденев А.А., Козодаев С.П., Перцев В.Т., Баранов Е.В., Загоруйко Т.В., Внуков Д.Н. Механизмы действия различных видов органоминеральных до-

бавок в цементной системе // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2021. № 9. С. 8–19. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-9-8-19. EDN UFSCDT.

5. Ghosal M., Chakraborty A.K. Superplasticizer compatibility with cement properties — a study // Materials Today: Proceedings. 2022. Vol. 56. Pp. 568–573. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.02.386

6. Шахова Л.Д. К вопросу совместимости цементов с пластифицирующими добавками // Цемент и его применение. 2024. № 4. С. 48–55. EDN DTZPCT.

7. Ortiz-Álvarez N., Lizarazo-Marriaga J., Brandão P.F.B., Santos-Panqueva Y., Carrillo J. Rheological properties of cement-based materials using a bio-polymer viscosity modifying admixture (BVMA) under different dispersion conditions // Cement and Concrete Composites. 2021. Vol. 124. P. 104224. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104224

8. Du J., Meng W., Khayat K.H., Bao Y., Guo P., Lyu Z. *et al.* New development of ultra-high-performance concrete (UHPC) // Composites Part B: Engineering. 2021. Vol. 224. P. 109220. DOI: 10.1016/j.compositesb.2021.109220

9. Перцев В.Т., Леденев А.А. Разработка эффективных комплексных органоминеральных добавок для регулирования реологических свойств бетонных смесей : монография. Воронеж : ВГАСУ, 2012. 135 с. EDN QNQCST.

10. Chen J., Qiao M., Gao N., Wu J., Shan G., Zhu B. *et al.* Acrylate based post-acting polymers as novel viscosity modifying admixtures for concrete // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 312. P. 125414. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125414

11. Ferraz D.F., Martho A.C.R., Burns E.G., de Oliveira Romano R.C., Pileggi R.G. Effect of prehydration of Portland cement on the superplasticizer consumption and the impact on the rheological properties and chemical reaction // Revista IBRACON de Estruturas e Materiais. 2023. Vol. 16. Issue 2. DOI: 10.1590/s1983-41952023000200010

12. Zhang Q., Chen J., Zhu J., Yang Y., Zhou D., Wang T. *et al.* Advances in organic rheology-modifiers (chemical admixtures) and their effects on the rheological properties of cement-based materials // Materi-

als. 2022. Vol. 15. Issue 24. P. 8730. DOI: 10.3390/ma15248730

13. Рахимбаев Ш.М., Логвиненко А.А. Реологические свойства материалов для строительства объектов транспортной инфраструктуры // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2014. № 5 (665). С. 26–33. EDN SQTAGF.

14. Khayat K.H., Meng W., Vallurupalli K., Teng L. Rheological properties of ultra-high-performance concrete — an overview // Cement and Concrete Research. 2019. Vol. 124. P. 105828. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.105828

15. Qiao M., Chen J., Gao N., Shan G., Wu J., Zhu B. *et al.* Effects of adsorption group and molecular weight of viscosity-modifying admixtures on the properties of cement paste // Journal of Materials in Civil Engineering. 2022. Vol. 34. Issue 7. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004296

16. Ji X., Pan T., Zhao W., Liu J., Sha J., Han F. Interaction of superplasticizers with C3A: Understanding the superplasticizer compatibility with cement // Journal of Materials in Civil Engineering. 2023. Vol. 35. Issue 9. DOI: 10.1061/JMCEE7.MTENG-15185

17. Shrihari S., Seshagiri Rao M.V., Srinivasa Reddy V., Manasa A. Compatibility assessment of commercial cements with superplasticizers // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 184. P. 01079. DOI: 10.1051/e3sconf/202018401079

18. Лесовик В.С., Шеремет А.А., Чулкова И.Л., Журавлева А.Э. Геоника (геомиметика) и поиск оптимальных решений в строительном материаловедении // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2021. Т. 18. № 1 (77). С. 120–134. DOI: 10.26518/2071-7296-2021-18-1-120-134. EDN HMWWZK.

19. Лесовик В.С., Фомина Е.В. Новая парадигма проектирования строительных композитов для защиты среды обитания человека // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 10. С. 1241–1257. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.10.1241-1257. EDN NPNPBT.

20. He D., Lu Z., Liang X., Liu R., Sun G. A study to improve the compatibility of PCE with cement paste containing clay // Materials Letters. 2022. Vol. 308. P. 131111. DOI: 10.1016/j.matlet.2021.131111

Поступила в редакцию 3 марта 2025 г.

Принята в доработанном виде 23 мая 2025 г.

Одобрена для публикации 21 июля 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Валерий Станиславович Лесовик — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительного материаловедения, изделий и конструкций; Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова); 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; naukavs@mail.ru;

Даниил Александрович Толыпин — аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций; Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова); 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; tolypin.daniil@yandex.ru;

Наталья Максимовна Толыпина — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций; **Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)**; 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; SPIN-код: 4650-2537, ORCID: 0000-0001-5788-8520; tolypina.n@yandex.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Tolypina N., Tolypin D. Influence of mineral fillers on the liquishing of cement systems with the help of surfactants. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2022; 9:26-33. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-9-26-33. EDN ENFGLL. (rus.).
2. Rakhimbaev Sh.M., Tolypina N.M., Khakhal-eva E.N. Interrelation between plastic viscosity of cement systems and their rheological characteristics. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2018; 15(2):(60):276-282. EDN XSDGCL. (rus.).
3. Lesovik V.S., Elistratkin M.Yu., Salmikova A.S., Kazlitina O.V. On the issue of improving the efficiency of high-strength self-compacting concretes. *Regional Architecture and Engineering*. 2021; 1(46):20-27. EDN DIRJUN. (rus.).
4. Ledenev A., Kozodaev S., Percev V., Baranov E., Zagoruyko T., Vnukov D. Mechanisms of act of various kinds of organic mineral additives in cement system. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2021; 9:8-19. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-9-8-19. EDN UFSCDT. (rus.).
5. Ghosal M., Chakraborty A.K. Superplasticizer compatibility with cement properties — a study. *Materials Today: Proceedings*. 2022; 56:568-573. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.02.386
6. Shakhova L.D. On the compatibility of cements with plasticizing additives. *Journal Cement and its Applications*. 2024; 4:48-55. EDN DTZPCT. (rus.).
7. Ortiz-Álvarez N., Lizarazo-Marriaga J., Brandão P.F.B., Santos-Panqueva Y., Carrillo J. Rheological properties of cement-based materials using a bio-polymer viscosity modifying admixture (BVMA) under different dispersion conditions. *Cement and Concrete Composites*. 2021; 124:104224. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104224
8. Du J., Meng W., Khayat K.H., Bao Y., Guo P., Lyu Z. et al. New development of ultra-high-performance concrete (UHPC). *Composites Part B: Engineering*. 2021; 224:109220. DOI: 10.1016/j.compositesb.2021.109220
9. Pertsev V.T., Ledenev A.A. *Development of effective complex organomineral additives for regulating the rheological properties of concrete mixtures : monograph*. Voronezh, VSUACE, 2012; 135. EDN QNQCST. (rus.).
10. Chen J., Qiao M., Gao N., Wu J., Shan G., Zhu B. et al. Acrylate based post-acting polymers as novel viscosity modifying admixtures for concrete. *Construction and Building Materials*. 2021; 312:125414. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125414
11. Ferraz D.F., Martho A.C.R., Burns E.G., de Oliveira Romano R.C., Pileggi R.G. Effect of prehydration of Portland cement on the superplasticizer consumption and the impact on the rheological properties and chemical reaction. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*. 2023; 16(2). DOI: 10.1590/s1983-41952023000-200010
12. Zhang Q., Chen J., Zhu J., Yang Y., Zhou D., Wang T. et al. Advances in organic rheology-modifiers (chemical admixtures) and their effects on the rheological properties of cement-based materials. *Materials*. 2022; 15(24):8730. DOI: 10.3390/ma15248730
13. Rakhimbaev Sh.M., Logvinenko A.A. Rheological properties of materials for transport infrastructural construction. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2014; 5(665):26-33. EDN SQTAGF. (rus.).
14. Khayat K.H., Meng W., Vallurupalli K., Teng L. Rheological properties of ultra-high-performance concrete — an overview. *Cement and Concrete Research*. 2019; 124:105828. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.105828
15. Qiao M., Chen J., Gao N., Shan G., Wu J., Zhu B. et al. Effects of adsorption group and molecular weight of viscosity-modifying admixtures on the properties of cement paste. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2022; 34(7). DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004296
16. Ji X., Pan T., Zhao W., Liu J., Sha J., Han F. Interaction of superplasticizers with C3A: Understanding the superplasticizer compatibility with cement. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2023; 35(9). DOI: 10.1061/JMCEE7.MTENG-15185
17. Shrihari S., Seshagiri Rao M.V., Srinivasa Reddy V., Manasa A. Compatibility assessment of commercial cements with superplasticizers. *E3S Web of Conferences*. 2020; 184:01079. DOI: 10.1051/e3sconf/20201-8401079
18. Lesovik V.S., Sheremet A.A., Chulkova I.L., Zhuravleva A.E. Geonics (Geomimetics) and search for optimal solutions in building materials science. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021;

18(1):(77):120-134. DOI: 10.26518/2071-7296-2021-18-1-120-134. EDN HMWWZK. (rus.).

19. Lesovik V.S., Fomina E.V. The new paradigm of designing construction composites to protect the human environment. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2019; 14(10):1241-1257.

DOI: 10.22227/1997-0935.2019.10.1241-1257. EDN NPNPBT. (rus.).

20. He D., Lu Z., Liang X., Liu R., Sun G. A study to improve the compatibility of PCE with cement paste containing clay. *Materials Letters*. 2022; 308:131111. DOI: 10.1016/j.matlet.2021.131111

Received March 3, 2025.

Adopted in revised form on May 23, 2025.

Approved for publication on July 21, 2025.

B I O N O T E S: **Valeriy S. Lesovik** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Building Materials Science, Products and Structures; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukov st., Belgorod, 308012, Russian Federation; naukavs@mail.ru;

Daniil A. Tolypin — postgraduate student of the Department of Building Materials Science, Products and Structures; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukov st., Belgorod, 308012, Russian Federation; tolypin.daniil@yandex.ru;

Natalia M. Tolypina — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Construction Materials Science, Products and Structures; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukov st., Belgorod, 308012, Russian Federation; SPIN-code: 4650-2537, ORCID: 0000-0001-5788-8520; tolypina.n@yandex.ru.

Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.