

Научная статья
 УДК 691:666.952.1
 DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-448-459>
 EDN: WJQTGA



РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ МИНЕРАЛЬНЫМИ И ПЛАСТИФИЦИРУЮЩИМИ ДОБАВКАМИ

В.С. Лесовик, Д.А. Толыпин ✉, А.Н. Ряпухин

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
 г. Белгород, Россия

✉ ответственный автор
 tolypin.daniil@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. На практике требуется получение смесей равной удобоукладываемости, оцениваемой стандартными техническими показателями (осадка конуса, распыл и др.), но в то же время с различными реологическими характеристиками. Эффективно снижают предел текучести и вязкость добавки-разжижители, однако влияние минеральных добавок в комбинации с органическими ПАВ на реологические показатели цементных дисперсий мало изучено. Работа посвящена исследованию данного вопроса.

Материалы и методы. Использовали тонкодисперсные кварц ($S_{y0}=340 \text{ м}^2/\text{кг}$) и мрамор ($S_{y0}=320 \text{ м}^2/\text{кг}$), полученные помолотом в лабораторной мельнице; вяжущее ЦЕМ I 42,5 Н ЗАО «Осколцемент» ($t_{н.схв}=230 \text{ мин}$; $НГ=26\%$, $C_3S=61,59\%$, $C_2S=14,2\%$, $C_3A=6,83\%$, $C_4AF=3,73\%$); суперпластификатор «Полипласт СП-1», гиперпластификатор Sunbo 2021. Реологические показатели цементных дисперсий определяли при малых градиентах скорости сдвига $\dot{\epsilon}$ до 25 с^{-1} , что позволяет обеспечить подобие потока в лабораторных и в реальных условиях.

Результаты. Установлено, что чистые и смешанные цементные дисперсии без добавок-разжижителей являются реологически сложными телами с наибольшим предельным напряжением сдвига и пластической вязкостью. Минеральные модификаторы в комбинации с пластифицирующими добавками эффективно снижают пластическую вязкость и напряжение сдвига, их течение переходит в режим ньютоновской жидкости с вязкостью, не зависящей от градиента скорости сдвига. Реологические показатели бездобавочных смешанных цементных дисперсий зависели от вида минерального наполнителя. При этом с вводом добавок-разжижителей преобладающее влияние на реологические показатели оказывают дозировки и химическая основа добавок.

Заключение. Смешанные цементно-мраморные и цементно-кварцевые дисперсии с вводом добавок разжижающего действия характеризуются более высокой текучестью, чем чисто цементные. Введение пластифицирующих добавок при определенных дозировках позволяет полностью снимать нелинейность, а ввод минеральных наполнителей усиливает эффективность действия ПАВ.

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

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. В.С.Лесовик – член редакционного совета журнала «Вестник СибАДИ». Журнал «Вестник СибАДИ» не освобождает от рецензирования рукописи ученых вне зависимости от их статуса.

БЛАГОДАРНОСТИ: Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда (проект №25-19-00866). Авторы выражают благодарность редакции журнала «Вестник СибАДИ» и рецензентам статьи.

Статья поступила в редакцию 17.01.2025; одобрена после рецензирования 17.02.2025; принята к публикации 16.06.2025.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

© Лесовик В.С., Толыпин Д.А., Ряпухин А.Н., 2025



Контент доступен под лицензией
 Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Лесовик В.С., Толыпин Д.А., Ряпухин А.Н. Реологические свойства цементных систем, модифицированных минеральными и пластифицирующими добавками // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 3. С. 448-459. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-448-459>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-448-459>

EDN: WJQTGA

RHEOLOGICAL PROPERTIES OF CEMENT SYSTEMS MODIFIED WITH MINERAL AND PLASTICIZING ADDITIVES

Valery S. Lesovik, Daniil A. Tolypin ✉, Alexander N. Ryapukhin

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov,
Belgorod, Russia

✉ corresponding author
tolypin.daniil@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. In practice, it is required to obtain mixtures both of equal workability, estimated by standard technical indicators (cone sediment, spreading, etc.) and of different rheological characteristics. Diluent additives effectively reduce the yield strength and viscosity, however, the effect of mineral additives in combination with organic surfactants on the rheological parameters of cement dispersions has been poorly studied. The paper is devoted to the study of this issue.

Research methods. Finely dispersed quartz ($S_{ud}=340 \text{ m}^2/\text{kg}$) and marble ($S_{ud}=320 \text{ m}^2/\text{kg}$) obtained by grinding in a laboratory mill were used; binder CEM I 42.5 H of Oskolcement CJSC ($t_{n,cw}=230 \text{ min}$; HF=26 %, C3S=61,59 %, C2S=14,2 %, C3A=6,83 %, C4AF=3,73 %); superplasticizer Polyplast SP-1, hyperplasticizer Sunbo 2021. Rheological parameters of cement dispersions were determined at low shear rate gradients $\dot{\epsilon}$ up to 25 sec^{-1} , which makes it possible to ensure the similarity of flow in laboratory and real conditions.

Results. It has been established that pure and mixed cement dispersions without diluent additives are rheologically complex bodies with the highest shear stress and plastic viscosity. Mineral modifiers in combination with plasticizing additives effectively reduce plastic viscosity and shear stress, and their flow transitions to the Newtonian fluid regime with a viscosity independent of the shear rate gradient. Rheological parameters without additional mixed cement dispersions depended on the type of mineral filler. At the same time, with the introduction of diluent additives, dosages and the chemical base of additives have a predominant effect on rheological parameters.

Conclusion. Mixed cement-marble and cement-quartz dispersions with the introduction of diluting additives are characterized by higher fluidity than cement dispersions. The introduction of plasticizing additives at certain dosages makes it possible to completely remove non-linearity, and the use of mineral fillers enhances the effectiveness of surfactants.

KEYWORDS: cement systems, mineral filler, plasticizer, yield strength, plastic viscosity, rheological properties

CONFLICT OF INTEREST: The authors declare no conflict of interest Lesovik V.S. member of the editorial council of The Russian Automobile and Highway Industry Journal. The Russian Automobile and Highway Industry Journal does not exempt scientists from reviewing the manuscript, regardless of their status.

ACKNOWLEDGEMENTS: The study was funded by the grant of the Russian Science Foundation (Project No. 25-19-00866). The authors express their gratitude to the editorial board of the journal The Russian Automobile and Highway Industry Journal and reviewers of the article.

The article was submitted: January 17, 2025; **approved after reviewing:** February 17, 2025; **accepted for publication:** June 16, 2025.

All authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Lesovik V.S., Tolypin D.A. Rheological properties of cement systems modified with mineral and plasticizing additives. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (3): 448-459. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-448-459>

© Lesovik V.S., Tolypin D.A., 2025



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы возрастает внимание к исследованиям рео-технологических свойств портландцементных суспензий, которые широко применяются в строительстве и при креплении нефтяных и газовых скважин [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]. На практике требуется получение смесей равной удобоукладываемости, оцениваемой стандартными техническими показателями (осадка конуса, расплыв и др.), но в то же время с различными величинами реологических свойств, характеризующими механическое поведение смесей при внешних воздействиях: предельное напряжение сдвига, эффективная вязкость. Применение данных показателей позволит оценить структурно-механические свойства систем и использовать добавки, которые обеспечат сохранение структуры строительных смесей при транспортировании и высокую текучесть при формовании [9, 10, 11, 12, 13]. К важным свойствам структурированных дисперсных систем можно отнести изменение их характеристик во времени, особенно с ростом или снижением скорости сдвига.

Большое внимание уделяется проведению исследований по использованию минеральных добавок как компонентов строительных материалов [12, 13, 14, 15]. Широкое применение находят добавки ПАВ, которые позволяют снизить реологические показатели, такие как предел текучести и вязкость, что дает возможность готовить самоуплотняющиеся строительные смеси, когда предел текучести приближается к нулевому уровню и отпадает необходимость механических воздействий [16, 17, 18, 19, 20, 21]. В то же время реоло-

гическим свойствам смесей портландцемента с минеральными и органическими добавками уделялось мало внимания. Эта работа посвящена исследованию данного вопроса.

Задачи исследования:

- исследовать влияние минеральных и пластифицирующих добавок на реологические показатели цементных дисперсий;
- выполнить анализ реологических моделей;
- провести сравнительный анализ полученных зависимостей реологической эффективности суперпластификаторов в цементных системах с минеральными модификаторами.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Использовались тонкодисперсные кварцевый ($S_{уд}=340 \text{ м}^2/\text{кг}$) и мраморный ($S_{уд}=320 \text{ м}^2/\text{кг}$) наполнители, полученные помолом в лабораторной мельнице (рисунок 1); вяжущее ЦЕМ I 42,5 Н ЗАО «Осколцемент» ($\tau_{H.CXB}=230 \text{ мин}$; НГ=26%, $C_3S=61,59\%$, $C_2S=14,2\%$, $C_3A=6,83\%$, $C_4AF=3,73\%$); 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). Цементные дисперсии готовили с В/Т=0,3, пластифицирующие добавки (0,2; 0,4; 0,6%) вводили с водой затворения, дозировки указаны от массы порошкового компонента. Смешанные цементно-мраморные и цементно-кварцевые дисперсии готовили при соотношении ПЦ: наполнитель=70:30. Реологические характеристики цементных дисперсий исследовали при помощи ротационного вискозиметра Rheotest RN 4.1.

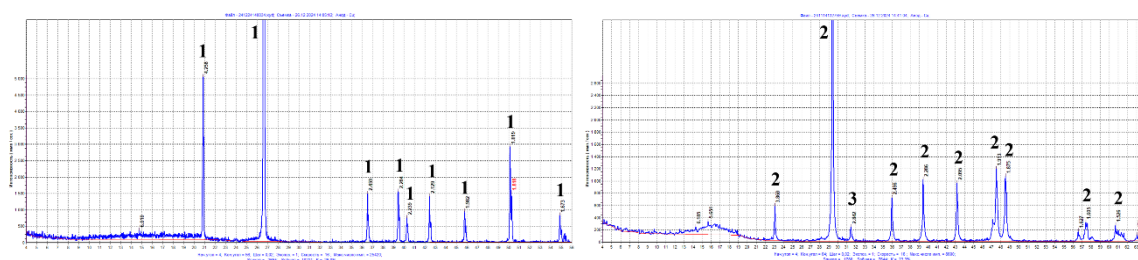
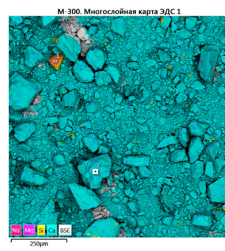
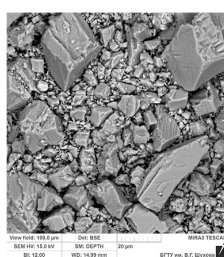


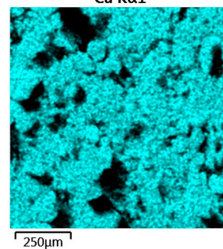
Рисунок 1 – Рентгенограммы применяемых наполнителей на основе кварцевого песка (а) и мрамора (б):
 1 – кварц ($d=4,24; 3,34; 2,45; 2,25; 2,123; 1,975; 1,813 \dots \text{Å}$);
 2 – кальцит ($d=3,84; 3,029; 2,49; 2,28; 2,19; 1,91; 1,87 \dots \text{Å}$);
 3 – доломит ($d=2,883; 2,191 \dots \text{Å}$)
 Источник: составлено авторами.

Figure 1 – X-ray images of applied fillers based on quartz sand (a) and marble (b):
 1 – quartz ($d=4,24; 3,34; 2,45; 2,25; 2,123; 1,975; 1,813 \dots \text{Å}$);
 2 – calcite ($d=3,84; 3,029; 2,49; 2,28; 2,19; 1,91; 1,87 \dots \text{Å}$);
 3 – dolomite ($d=2,883; 2,191 \dots \text{Å}$)
 Source: compiled by the author.

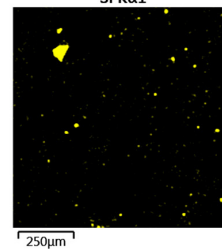
Мрамор



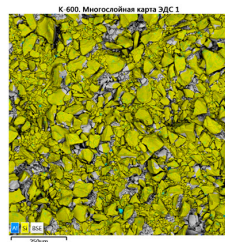
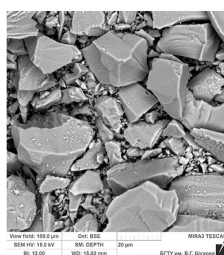
Ca Kα1



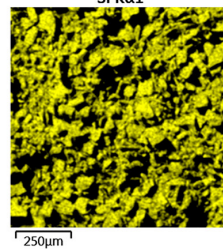
Si Kα1



Кварц



Si Kα1



Al Kα1

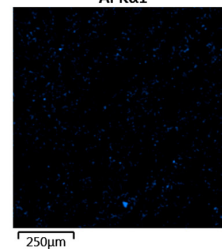


Рисунок 2 – Микроанализ поверхности частиц с помощью картирования
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Microanalysis of the particle surface using mapping
Source: compiled by the author.

Микроанализ поверхности мраморных и кварцевых порошков с помощью картирования с использованием растрового электронного микроскопа TESCAN MIRA 3 LM приведен на рисунке 2.

Молотые кварц и мрамор характеризуются стабильным химическим составом, содержат незначительное количество сопутствующих примесей и аксессуарных минералов. При помоле кварцевого песка образуется более однородная смесь частиц по размеру по сравнению с продуктом помола мрамора.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Исследования реологических свойств дисперсий на цементной основе проводились при малых градиентах скорости сдвига $\dot{\epsilon}$ до 25 c^{-1} , что в большой степени моделирует подобие потока в реометре и в реальных условиях течения. На рисунках 3, 4 приведены зависимости предельного динамического напряжения сдвига и пластической вязкости цементных, а также цементно-мраморных и цементно-кварцевых дисперсий от дозировок пластифицирующих добавок СП-1 и Sunbo 2021. Из представленных графиков следует, что чистые и смешанные цементные дисперсии без пластифицирующих добавок представляют собой реологически сложные тела с большим предельным напряжением сдвига и пластической вязкостью, которые снижаются по мере увеличения дозировки химических модификаторов.

Реограмма чистого цементного теста с $B/T=0,3$ показывает, что цементное тесто имеет большой предел текучести – $152,2 \text{ Па}$. В области малых градиентов скорости сдвига до $8\text{--}10 \text{ c}^{-1}$ наблюдается течение в соответствии с моделью Шведова, с увеличением скорости сдвига от 10 до 25 c^{-1} происходит разрушение коагуляционной структуры, в результате кривая демонстрирует аномальное течение.

Смешанные цементно-мраморные ($70:30$, $B/C=0,3$) и цементно-кварцевые ($70:30$, $B/C=0,3$) дисперсии без супер- и гиперпластификатора проявляют свойства нелинейного вязко-пластичного тела с тиксотропными свойствами (см. рисунок 3). Цементно-мраморная суспензия без разжижителей в интервале градиента скорости сдвига $\dot{\epsilon}=0,2\text{--}0,7 \text{ c}^{-1}$ обладает свойствами упругого тела (модель Гука), предельное напряжение сдвига – $153,6 \text{ Па}$. С ростом градиента скорости сдвига от $0,8$ до $9,1 \text{ c}^{-1}$ напряжение сдвига увеличилось от $153,6$ до $219,9 \text{ Па}$, при этом течение цементно-мраморной суспензии происходило с неразрушенной коагуляционной структурой и максимальной пластической вязкостью, что соответствует реологической модели Шведова. В интервале $\dot{\epsilon}=9,1\text{--}11,2 \text{ c}^{-1}$ наблюдался перелом реологической кривой, связанный с резким разрушением коагуляционной структуры (кластеров частиц мрамора и портландцемента), а при градиенте скорости сдвига $12,3\text{--}24,8 \text{ c}^{-1}$ происходит переход течения дисперсии на

чисто пластический режим по модели Сен-Венана, когда структура пластического тела разрушена и сопротивление напряжению отсутствует. Прямая и обратная ветви реограммы значительно расходятся, что свидетельствует об увеличении периода релаксации структуры цементного теста. Предел текучести на обратной ветви реограммы уменьшился почти в два раза с резким подъемом в конечной области $\dot{\epsilon}$, равной нескольким обратным секундам, до 83,1 Па.

Цементно-кварцевая суспензия без добавок-разжижителей демонстрирует свойства упругого тела в интервале градиента скорости сдвига $\dot{\epsilon} = 0,2\text{--}0,7 \text{ с}^{-1}$ (модель Гука), предельное напряжение сдвига – 181,3 Па (см. рисунок 3). Наблюдаются два участка в области течения: на первом участке в интервале $\dot{\epsilon} = 0,7\text{--}8,1 \text{ с}^{-1}$ течение происходит в соответствии с моделью Шведова с неразрушенной коагуляционной структурой, напряжение сдвига возрастает от 181,3 до 296,9 Па. Затем при $\dot{\epsilon} = 9,2\text{--}13,4 \text{ с}^{-1}$ происходит резкое разрушение структуры дисперсии в достаточно узкой области, около 4 с^{-1} , и переход в область линейного течения. При градиенте скорости сдвига $\dot{\epsilon} = 14,4\text{--}24,8 \text{ с}^{-1}$ цементно-кварцевая суспензия превращается в пластическое тело по модели Сен-Венана. Прямой и обратный ход ветвей реограмм демонстрируют расширение периода релаксации структуры цементного теста. Предел текучести на обратной ветви реограммы уменьшился до 62,1 Па.

В целом можно отметить схожесть реологических моделей цементных дисперсий и заметное влияние вида порошкообразного наполнителя на реологические показатели. Цементно-мраморные дисперсии отличаются от цементно-кварцевых более низким значением предела текучести при $\dot{\epsilon} \rightarrow 0$, на прямой реограмме – на 27,7 Па и более высоким на обратной реограмме – на 21,1 Па. А также более низкими значениями вязкости: при $\dot{\epsilon} \rightarrow 0$ на прямой реограмме – на 39,2 Па·с, на обратной реограмме – на 34,8 Па·с, а при максимальном градиенте скорости сдвига $\dot{\epsilon}$ – на 3,1 Па·с. Можно отметить несколько более узкую петлю гистерезиса у цементно-мраморных дисперсий.

Диаграммы течения цементно-мраморных и цементно-кварцевых суспензий с добавкой гиперпластификатора Sunbo 2021 показывают, что уже при вводе в суспензию 0,2% Sunbo реограммы приобретают линейный характер, а с дальнейшим увеличением дозировки гиперпластификатора степень нелинейности

реограмм снижается незначительно. Таким образом, ввод поликарбоксилатного гиперпластификатора уже минимальной дозировки (0,2%) практически снимает нелинейность и суспензия течет при заданных градиентах с постоянной скоростью. При этом наблюдается существенное снижение величины предельного напряжения сдвига до 1,53 Па (ПЦ:Мр) и 1,32 Па (ПЦ:Кв) практически независимо от вида минерального наполнителя. С повышением дозировок ГП от 0,2% до 0,4 и 0,6% изменение реологических параметров суспензий ослабевает, значения предельного напряжения сдвига опускаются до 0,74 и 0,67 Па с мраморным наполнителем; до 0,75 и 0,55 Па – с кварцевым. Наблюдается сильное разжижение смешанных дисперсий с течением, близким к ньютоновскому. Большое снижение предела текучести смешанных цементных суспензий от немодифицированных (153,6 Па (ПЦ:Мр) и 181,3 (ПЦ:Кв)) к модифицированным гиперпластификатором Sunbo 2021 способствует практически ликвидации участков с упругой деформацией. В интервале $\dot{\epsilon}$ от 0,5 до 5 с^{-1} прямая и обратная ветви реограмм цементно-мраморных дисперсий сливаются, что говорит о быстром периоде релаксации структуры, у цементно-кварцевых дисперсий релаксация внутренних напряжений несколько замедлена.

При добавлении в цементную суспензию суперпластификатора СП-1 в малой дозировке, 0,2%, проявляются вязко-пластические свойства (см. рисунок 3), что демонстрирует существенную разницу по эффективности влияния добавок-разжижителей с различной химической основой на реологические свойства смешанных цементных дисперсий. Цементно-кварцевые и цементно-мраморные суспензии с суперпластификатором СП-1 (0,2%) в интервале 15–20 Па проявляют свойства упругого тела (модель Гука). В интервале градиента скорости сдвига $0,5\text{--}2 \text{ с}^{-1}$ наблюдается кратковременный период течения суспензий с неразрушенной коагуляционной структурой и наибольшей вязкостью (модель Шведова), затем при $2\text{--}5 \text{ с}^{-1}$ быстрое разрушение коагуляционной структуры и далее течение с полностью разрушенной структурой и наименьшей вязкостью. Прямая и обратная ветви реограммы при $\dot{\epsilon} < 5 \text{ с}^{-1}$ совпадают, что говорит о быстром периоде релаксации структуры суспензий. Предел текучести на прямой ветви реограммы составил 23,52 Па (ПЦ:Кв) и 19,43 Па (ПЦ:Мр) на обратной ветви 28,81 Па (ПЦ:Кв) и 19,96 Па (ПЦ:Мр).

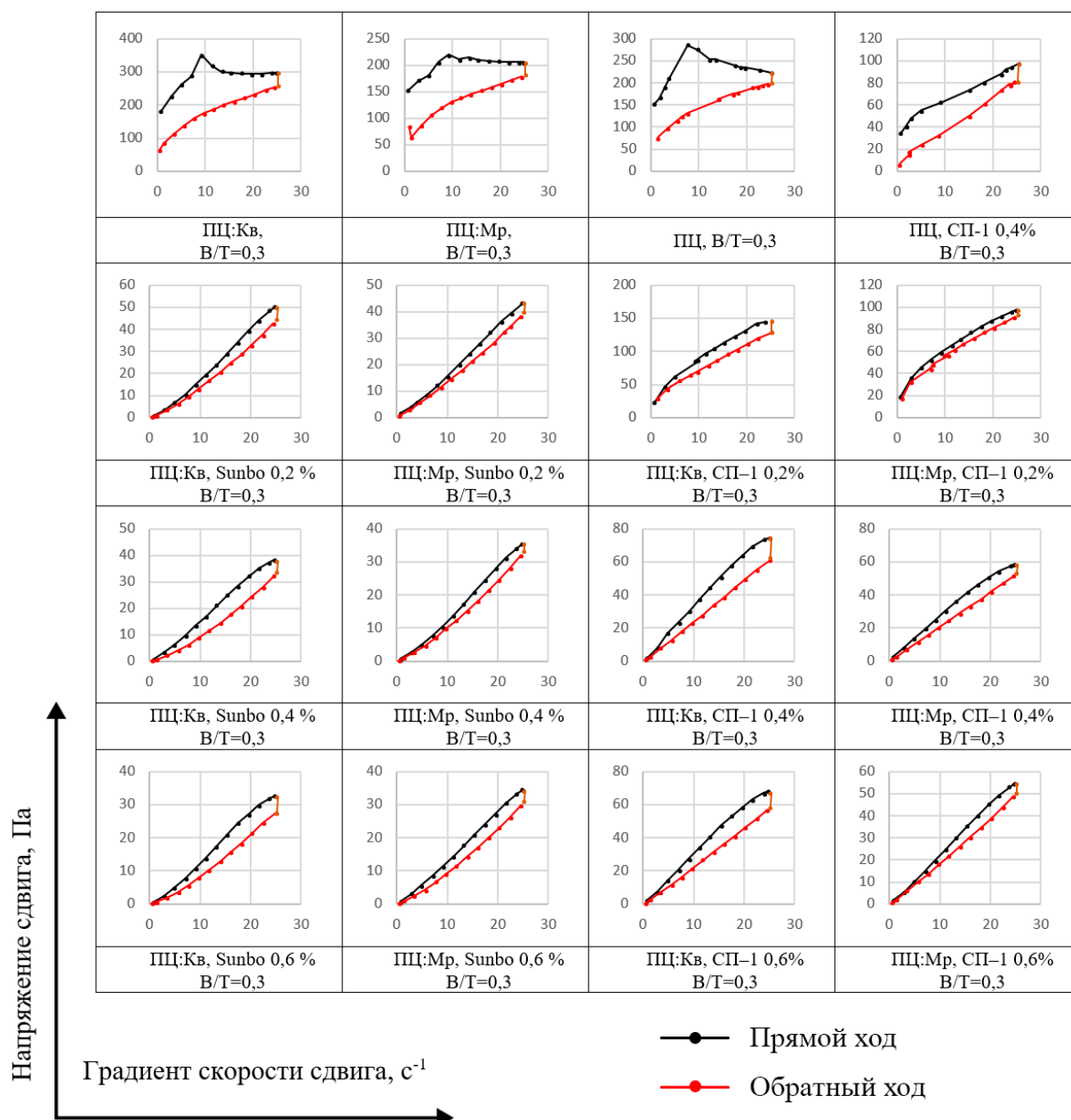


Рисунок 3 – Реограммы цементных дисперсий с минеральными и органическими модификаторами
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Rheograms of cement dispersions with mineral and organic modifiers
Source: compiled by the author.

С ростом дозировки СП-1 до 0,4 и 0,6% снижается степень нелинейности реограмм, при этом течение дисперсий при данных градиентах скорости идет, хотя с очень малой вязкостью, но приблизительно в 2-3 раза большей, чем при вводе гиперпластификатора Sunbo. Наблюдается петля гистерезиса между прямой и обратной ветвями реограмм, а в интервале малых значений градиента скорости

сдвига $\dot{\epsilon} < 5 \text{ с}^{-1}$ происходит совпадение прямой и обратной ветвей, что свидетельствует о коротечном периоде релаксаций внутренних напряжений. Прямая и обратная ветвь реограмм отражают отсутствие трансформации структуры течения. Пределы текучести очень близки и при СП-1=0,4% равны на прямой ветви 1,97 Па (ПЦ:Кв) и 2,53 Па (ПЦ:Мр), на обратной ветви 0,62 Па (ПЦ:Кв) и 0,78 Па (ПЦ:Мр).

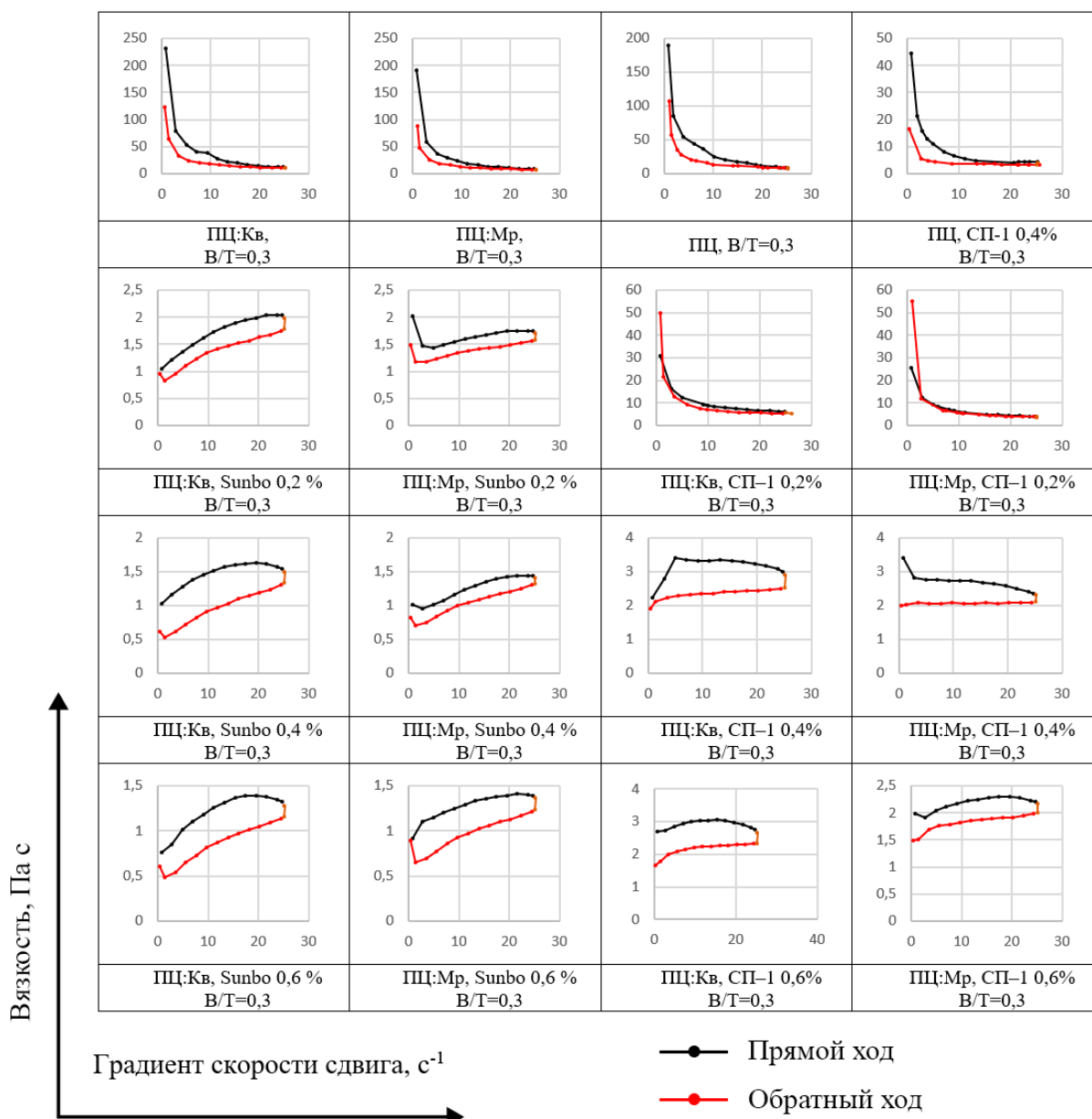


Рисунок 4 – Вязкость цементных дисперсий с минеральными и органическими модификаторами
Источник: составлено авторами.

Figure 4. – Viscosity of cement dispersions with mineral and organic modifiers
Source: compiled by the author.

Применение СП-1 в наибольшей дозировке 0,6% приводит к максимальному снижению предела текучести и суспензии приобретают свойства ньютоновской жидкости. Повышение дозировки СП-1 до 0,6% снизили пределы текучести на прямой ветви до 1,75 Па (ПЦ:Кв) и 1,56 Па (ПЦ:Мр), на обратной ветви до 0,77 Па (ПЦ:Кв) и 0,55 Па (ПЦ:Мр).

Кривые зависимости пластической вязкости смешанных цементных суспензий от градиента скорости сдвига (см. рисунок 4) де-

монстрируют резкое падение вязкости практически в 100 раз при вводе гиперпластификатора Sunbo 2021 уже в минимальной дозировке. Характер течения смешанных цементных суспензий приближен к ньютоновскому. К особенностям цементных суспензий с гиперпластификатором можно отнести некоторое повышение пластической вязкости с ростом градиента скорости сдвига, что является отражением дилатантных свойств.

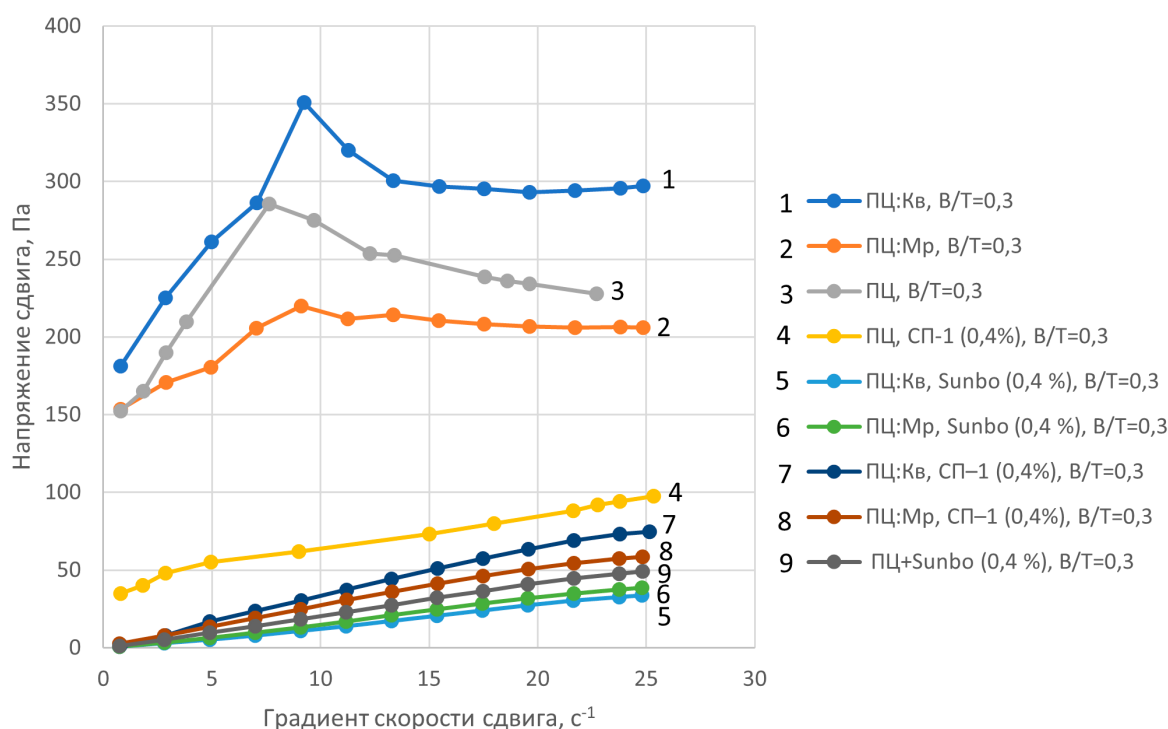


Рисунок 5 – Влияние минеральных и пластифицирующих добавок на напряжение сдвига цементных дисперсий
Источник: составлено авторами.

Figure 5. – The effect of mineral and plasticizing additives on the shear stress of cement dispersions
Source: compiled by the author.

В противоположность этим телам у тиксотропных дисперсных систем при увеличении скорости сдвига вязкость снижается. Однако проявление дилатантных свойств весьма слабое.

Как видно из рисунка 4, в зависимости от дозировки СП-1 происходит изменение показателей вязкости смешанных цементных дисперсий. При малой дозировке СП-1 (0,2%) вязкость цементно-кварцевых дисперсий существенно снижается от 30,86 до 5,92 Па·с, а цементно-мраморных от 25,43 до 3,92 Па·с в исследованном диапазоне $\dot{\epsilon}$. С повышением дозировки СП-1 до 0,4% вязкость цементно-мраморных суспензий снижается в интервале $\dot{\epsilon}=0,5-5 \text{ с}^{-1}$ приблизительно на 1–1,2 Па·с и остается практически постоянной (2,1–2,3 Па·с), а у цементно-кварцевых суспензий в интервале $\dot{\epsilon}=0,5-5 \text{ с}^{-1}$ незначительно повышается на 1–1,2 Па·с и стабилизируется на уровне 3,3 Па·с, обратные ветви представлены горизонтальными линиями. При дозировке СП-1 0,6% после незначительного снижения вязкости в интервале $\dot{\epsilon}=0,5-4 \text{ с}^{-1}$ на 0,2–0,4 Па·с происходит слабое увеличение, отражающее дилатантное течение.

Сравнительный анализ зависимостей предельного динамического напряжения сдвига цементных дисперсий различного состава (рисунок 5) свидетельствует о том, что чистые и смешанные цементные суспензии без добавок-разжижителей являются реологически сложными телами с наибольшим предельным напряжением сдвига и пластической вязкостью. Минеральные модификаторы в комбинации с пластифицирующими добавками эффективно снижают пластическую вязкость и напряжение сдвига, происходит снижение степени нелинейности реограмм. При добавлении в дисперсии одинаковых дозировок (0,4%) добавок-разжижителей видно, что с гиперпластификатором Sunbo реограммы характеризуются четко выраженным прямолинейным характером, а при добавлении 0,4% суперпластификатора СП-1 прямолинейная зависимость проявляется только у смешанных цементных дисперсий, что позволяет утверждать о проявлении в подобных случаях аддитивного дефлокуляционного действия минерального и органического компонентов.

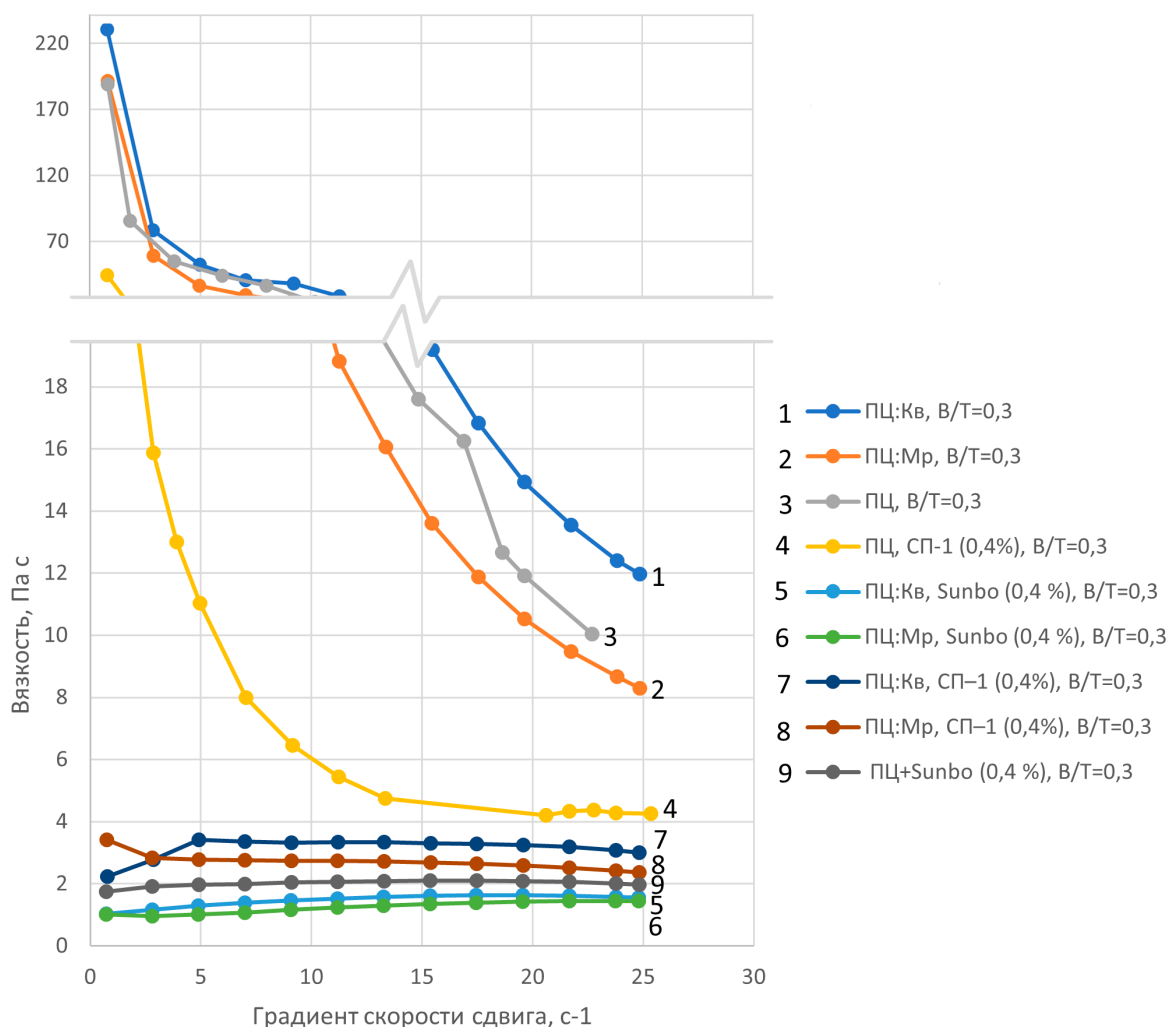


Рисунок 6 – Влияние минеральных и пластифицирующих добавок на пластическую вязкость цементных дисперсий
 Источник: составлено авторами.

Figure 5. – The effect of mineral and plasticizing additives on the plastic viscosity of cement dispersions
 Source: compiled by the author.

Наибольшее влияние на величину предельного напряжения сдвига оказывают порошковые модифицирующие минеральные компоненты с поликарбоксилатным разжижителем Sunbo, а суперпластификатор СП-1 на нафталинформальдегидной основе влияет слабее на реологические параметры суспензий. Значения пластической вязкости бездобавочных и смешанных цементных суспензий с добавками супер- и гиперпластификатора значительно снижаются с ростом скорости сдвига (рисунок 6).

Во всех случаях введение пластифицирующих добавок в определенных дозировках

позволяет полностью снимать нелинейность, а ввод минерального наполнителя усиливает эффективность их действия. В итоге уже при малых градиентах скорости сдвига происходит разрушение флокулентной структуры и переход течения дисперсии в область с минимальной вязкостью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что чистые и смешанные цементные суспензии без пластифицирующих добавок представляют собой нелинейные вязко-пластичные тела с тиксотропными свойствами, с наибольшим предельным на-

пряжением сдвига и пластической вязкостью. Течение смешанных суспензий при низких градиентах скорости сдвига происходило в соответствии с реологической моделью Шведова, а после разрушения коагуляционной структуры наблюдался пластический режим течения по модели Сен-Венана.

Смешанные цементно-мраморные и цементно-кварцевые дисперсии с вводом добавок разжижающего действия характеризуются более высокой текучестью, чем чисто цементные дисперсии. Смешанные цементные дисперсии менее склонны к флокуляции, у них физическая способность к агрегированию слабее выражена, чем у портландцемента. В цементном тесте притяжение частиц силикатов к алюминатам сильнее и более высокого уровня с проявлением химических связей, в то время как молотые кварц или мрамор проявляют слабую силу притяжения по отношению к цементному тесту, что усиливает дефлокулирующее действие ПАВ.

Установлено, что реологические показатели смешанных цементных дисперсий при отсутствии пластифицирующих добавок зависели от вида минерального наполнителя. В то же время с вводом добавок-разжижителей реологические характеристики в большей степени зависели от дозировок и химической основы добавок и мало зависели от вида минерального наполнителя. Применение поликарбонилатного модификатора нового поколения Sunbo 2021 уже при малых дозировках снижает предел текучести и пластическую вязкость в сотни раз, происходит переход в режим, близкий к ньютоновскому течению с отсутствием участков упругой деформации. Наблюдается быстрый период релаксации структуры суспензий, что отражается совпадением прямой и обратной ветвей реограмм при низких градиентах скорости сдвига. Эффективность суперпластификатора СП-1 зависела от дозировки: при малой дозировке дисперсии вели себя как нелинейное сложное реологическое тело, а с ростом дозировки СП-1 и плавным разрушением слабой коагуляционной структуры происходило постепенное снижение степени нелинейности с ликвидацией участков упругой деформации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. 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.
2. Рахимбаев Ш.М., Толыпина Н.М., Хахалева Е.Н. Взаимосвязь между пластической вязкостью цементных систем и их реотехнологическими характеристиками // Вестник СибАДИ. 2018. № 15(2). С. 276–282. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-2-276-282>
3. Ortiz-Álvarez N., Lizarazo-Marriaga J., Brandão P.F.B., Santos-Panqueva Y., et al. Rheological properties of cement-based materials using a bio-polymer viscosity modifying admixture (BVMA) under different dispersion conditions. *Cem. Concr. Compos.* 2021; 124: 104224.
4. Перцев В.Т., Леденев А.А. Разработка эффективных комплексных органоминеральных добавок для регулирования реологических свойств бетонных смесей: монография. Воронеж: Воронежский ГАСУ. 2012. 136 с.
5. Chen J., Qiao M., Gao N., Wu J., et al. Acrylate based post-acting polymers as novel viscosity modifying admixtures for concrete. *Constr. Build. Mater.* 2021; 312:125414.
6. Шахова Л.Д. К вопросу совместимости цемента с пластифицирующими добавками // Цемент и его применение. 2024. № 4. С.48–55. DOI:10.61907/CIA.2024.66.94.001
7. Рахимбаев Ш.М., Логвиненко А.А. Реологические свойства материалов для строительства объектов транспортной инфраструктуры // Известия вузов. Строительство. 2014. № 5. С.26–33.
8. Khayat K.H., Meng, W., Vallurupalli K., Teng, L. Rheological properties of ultra-high-performance concrete – An overview. *Cem. Concr. Res.* 2019; 124:105828.
9. Baoguo M.A., Huixian Wang. Rheological properties of self-compacting concrete paste containing chemical admixtures // *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* 2013; 28(2): 291–297.
10. Ji X., Pan T., Zhao W., Lu J., et al. Interaction of superplasticizers with C3A: Understanding the superplasticizer compatibility with cement. *J. of Mater. in Civil Engin.* 2023; 35(9): 15185.
11. Shrihari S., Seshagiri Rao M.V., Srinivasa Reddy V., Manasa A. Compatibility assessment of commercial cements with superplasticizers. *ICMED 2020. E 3S Web of Conferences.* 2020; 184: 01079.
12. Qiao M., Chen J., Gao N., et al. Effects of adsorption group and molecular weight of viscosity modifying admixtures on the properties of cement paste. *J. Mater. Civ. Eng.* 2022; 34: 04022148.
13. Menon S.M. Sathyan D., Anand K.B. Studies on rheological properties of superplasticised PPC paste. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET).* 2017. 8(10): 939–947.
14. 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.
15. Лесовик В.С., Шеремет А.А., Чулкова И.Л., Журавлева А.Э. Геоника (геомиметика) и поиск оптимальных решений в строительном материаловедении // Вестник СибАДИ. 2021. Т. 18, № 1 (77). С. 120–134. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-120-134>

16. Zhang Q., Chen J., Zhu J., Yang Y., et al. Advances in organic rheology-modifiers (chemical admixtures) and their effects on the rheological properties of cement-based materials. *Materials*. 2022; 15:8730.

17. Слюсарь А.А., Шаповалов Н.А., Полуэктова В.А. Регулирование реологических свойств цементных смесей и бетонов добавками на основе оксифенолфурфурольных олигомеров // Строительные материалы. 2008. № 7. С.42–43.

18. Рахимбаев Ш.М., Толыпина Н.М., Хахалева Е.Н. Влияние мелкого заполнителя из песка на эффективность действия добавок-разжижителей // Вестник СибАДИ. 2016. № 3 (49). С. 74–79.

19. Chen J., Gao N., Wu J., Shan G., et al. Effects of the charge density of anionic copolymers on the properties of fresh cement pastes. *Constr. Build. Mater.* 2020; 263: 120207.

20. Ferraz D.-F., Martho A.C.R., Burns E.G., Romano R.C.O., et al. 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): 1–14.

21. Du J., Meng W., Khayat K.H., Bao Y., et al. New development of ultra-high-performance concrete (UHPC). *Compos. Part B Eng.* 2021; 224: 109220.

REFERENCES

1. Lesovik V.S., Elistratkin M.Yu., Salnikova 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. (in Russ.)

2. Rakhimbayev Sh.M., Tolypina N.M., Khakhaleva E.N. Interrelation between plastic viscosity of cement systems and their rheological characteristics. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2018; 15(2): 276-282. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-2-276-282>

3. Ortiz-Álvarez N., Lizarazo-Marriaga J., Brandão P.F.B., Santos-Panqueva Y., et al. Rheological properties of cement-based materials using a bio-polymer viscosity modifying admixture (BVMA) under different dispersion conditions. *Cem. Concr. Compos.* 2021; 124: 104224.

4. Pertsev V.T., Ledenev A.A. *Development of effective complex organomineral additives for regulation of rheological properties of concrete mixtures: monograph*. Voronezh: Voronezhskij GASU; 2012. (in Russ.)

5. Chen J., Qiao M., Gao N., Wu J., et al. Acrylate based post-acting polymers as novel viscosity modifying admixtures for concrete. *Constr. Build. Mater.* 2021; 312: 125414.

6. Shakhova L.D. On the compatibility of cements with plasticizing additives. *Cement i ego primeneniye*. 2024; 4: 48–55. (in Russ.)

7. Rakhimbaev Sh.M., Logvinenko A.A. Rheological properties of materials for the construction of transport infrastructure facilities. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 2014; 5: 26–33. (in Russ.)

8. Khayat K.H., Meng W., Vallurupalli K., Teng L. Rheological properties of ultra-high-performance concrete – An overview. *Cem. Concr. Res.* 2019; 124: 105828.

9. Baoguo M.A., Huixian Wang. Rheological properties of self-compacting concrete paste containing chemical admixtures. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* 2013; 28(2): 291–297.

10. Ji X., Pan T., Zhao W., Lu J., et al. Interaction of superplasticizers with C3A: Understanding the superplasticizer compatibility with cement. *J. of Mater. in Civil Engin.* 2023; 35(9): 15185.

11. Shrihari S., Seshagiri Rao M.V., Srinivasa Reddy V., Manasa A. Compatibility assessment of commercial cements with superplasticizers. *ICMED 2020. E 3S Web of Conferences*. 2020; 184: 01079.

12. Qiao M., Chen J., Gao N., et al. Effects of adsorption group and molecular weight of viscosity modifying admixtures on the properties of cement paste. *J. Mater. Civ. Eng.* 2022; 34: 04022148.

13. Menon S.M., Sathyan D., Anand K.B. Studies on rheological properties of superplasticised PPC paste. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCET)*. 2017. 8(10): 939–947.

14. Lesovik V.S., Fomina E.V. A new paradigm of designing building composites to protect the human environment. *Vestnik MGSU*. 2019; 14(10): 1241-1257. (in Russ.)

15. 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):120-134. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-120-134>

16. Zhang Q., Chen J., Zhu J., Yang Y., et al. Advances in organic rheology-modifiers (chemical admixtures) and their effects on the rheological properties of cement-based materials. *Materials*. 2022; 15: 8730.

17. Slyusar A.A., Shapovalov N.A., Poluektova V.A. Regulation of rheological properties of cement mixtures and concretes with additives based on oxyphenolfurfural oligomers. *Stroitel'ny'e materialy*. 2008; 7: 42–43. (in Russ.)

18. Rakhimbaev Sh.M., Stolypina N.M., Khakhaleva E.N. [The effect of fine sand filler on the effectiveness of diluent additives]. *Vestnik SibADI*. 2016; 3(49): 74–79. (in Russ.)

19. Chen J., Gao N., Wu J., Shan G., et al. Effects of the charge density of anionic copolymers on the properties of fresh cement pastes. *Constr. Build. Mater.* 2020; 263: 120207.

20. Ferraz D.-F., Martho A.C.R., Burns E.G., Romano R.C.O., et al. 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): 1–14.

21. Du J., Meng W., Khayat K.H., Bao Y., et al. New development of ultra-high-performance concrete (UHPC). *Compos. Part B Eng.* 2021; 224: 109220.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Лесовик В.С. Постановка задач исследования. Выбор методологии и методов. Обобщение результатов работы, формулирование выводов. Редактирование статьи.

Толыпин Д.А. Выполнение экспериментальных исследований, обработка результатов. Оформление статьи.

Ряпукhin А.Н. Обзор литературы, изучение результатов ранее опубликованных работ по тематике публикации, проведение исследований, формулировка выводов по результатам исследования.

CONTRIBUTION OF AUTHORS

V.S. Lesovik Setting research objectives. The choice of methodology and methods. Summarizing the results of the work, formulating conclusions. Editing the article.

D.A. Tolypin Performing experimental studies, processing the results. The design of the article.

A.N. Ryapukhin Literature review, study of the results of previously published works on the subject of the publication, research, formulation of conclusions on the results of the study.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лесовик Валерий Станиславович – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Строительное материаловедение, изделия и конструкции» БГТУ им. В.Г. Шухова (308012, Россия, г. Белгород, ул. Костюкова 46).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2378-3947>,

SPIN-код: 2873-6860,

Scopus Author ID: 55887733300,

ResearcherID: A-4757-2016,

e-mail: naukavs@mail.ru

Толыпин Даниил Александрович – аспирант кафедры «Строительное материаловедение, изделия и конструкции» БГТУ им. В. Г. Шухова (308012, Россия, г. Белгород, ул. Костюкова 46.).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9920-7180>,

SPIN-код: 8868-1209,

Scopus Author ID: 57215534293,

e-mail: tolypin.daniil@yandex.ru

Ряпукhin Александр Николаевич – аспирант кафедры «Строительное материаловедение, изделия и конструкции» БГТУ им. В. Г. Шухова (308012, Россия, г. Белгород, ул. Костюкова 46.).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6935-8452>.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Valery 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 (46 Kostyukova St., Belgorod, 308012).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2378-3947>,

SPIN-код: 2873-6860,

Scopus Author ID: 55887733300,

ResearcherID: A-4757-2016,

e-mail: 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, (46 Kostyukova St., Belgorod, 308012).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9920-7180>,

SPIN-код: 8868-1209,

Scopus Author ID: 57215534293,

e-mail: tolypin.daniil@yandex.ru

Alexander N. Ryapukhin – Postgraduate student of the Department of Building Materials Science, Products and Structures Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, (46 Kostyukova St., Belgorod, 308012).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6935-8452>.