

Научно-исследовательский журнал «*Chemical Bulletin*»

<https://cb-journal.ru>

2024, Том 7, № 4 / 2024, Vol. 7, Iss. 4 <https://cb-journal.ru/archives/category/publications>

Научная статья / Original article

УДК 544.7

DOI: 10.58224/2619-0575-2024-7-4-48-63

Реологические свойства и структурообразование минеральной суспензии с комплексной органоминеральной добавкой

¹ Старченко С.А. *,

¹ Полужкова В.А.,

¹ Шаповалов Н.А.,

¹ Кожанова Е.П.,

¹ Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,

* Ответственный автор E-mail: sereja650@mail.ru

Аннотация: данная работа направлена на исследование реологических свойств и процессов структурообразования в высококонцентрированных минеральных суспензиях, модифицированных комплексной органоминеральной добавкой на основе флороглюцинфурфурольного олигомера и частиц диоксида кремния нанодиапазона.

Методы. Распределение частиц диоксида кремния и их модальный размер в добавках определяли методом лазерной дифракции света на приборе Mastersizer 3000 и методом динамического рассеивания света на приборе Microtrac S3500. Реологические свойства суспензий определяли с помощью коаксиально-цилиндрического ротационного вискозиметра безредукторного типа «Реотест-2.1». Сроки схватывания и структурообразование цементного теста оценивали на приборе Вика. Пластическую прочность цементного теста определяли с помощью конического пластометра Ребиндера. Прочность на сжатие цементного камня определяли на автоматическом гидравлическом прессе «ПГМ-100МГ4».

Выводы. Установлено, что комплексная органоминеральная добавка снижает предельное динамическое напряжения сдвига минеральных смесей, уменьшает пластическую прочность смесей в начальный период и сокращает срок схватывания, обеспечивая баланс между замедлением и развитием прочности за счет направленного формирования консолидированных надмолекулярных структур силиката кальция, которые структурируют цементную матрицу. Установлено, что наночастицы диоксида кремния, входящие в состав комплексной органоминеральной добавки, не влияют на реологические свойства системы в начальный период, в отличие от частиц Аэросила, которые увеличивают предельное динамическое напряжения сдвига смеси, что обусловлено высокой дисперсностью частиц.

Ключевые слова: реология, структурообразование, минеральные суспензии, комплексные добавки, наномодифицирование, диоксид кремния

Для цитирования: Старченко С.А., Полуэктова В.А., Шаповалов Н.А., Кожанова Е.П. Реологические свойства и структурообразование минеральной суспензии с комплексной органоминеральной добавкой // Chemical Bulletin. 2024. Том 7. № 4. С. 48 – 63. DOI: 10.58224/2619-0575-2024-7-4-48-63

Поступила в редакцию: 2 июля 2024 г.; Одобрена после рецензирования: 3 сентября 2024 г.; Принята к публикации: 12 октября 2024 г.

Rheological properties and structure formation of a mineral suspension with a complex organic and mineral additive

¹ *Starchenko S.A.**,

¹ *Poluektova V.A.*,

¹ *Shapovalov N.A.*,

¹ *Kozhanova E.P.*,

¹ *Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*,

* Corresponding author E-mail: sereja650@mail.ru

Abstract: this work is aimed at studying the rheological properties and processes of structure formation in highly concentrated mineral suspensions modified with a complex organic and mineral additive based on a fluoroglucinifurfural oligomer and nanodiamond silicon dioxide particles.

Methods. The distribution of silicon dioxide particles and their modal size in additives were determined by laser light diffraction on the Mastersizer 3000 device and by dynamic light scattering on the Microtrac S3500 device. The rheological properties of the suspensions were determined using a coaxial cylindrical rotary viscometer of the gearless type “Rheotest-2.1”. The setting time and structure formation of the cement dough were evaluated on a Vika device. The plastic strength of the cement dough was determined using a conical Rebinder plastometer. The compressive strength of cement stone was determined using an automatic hydraulic press “PGM-100MG4”.

Conclusions. It has been established that a complex organic and mineral additive reduces the limiting dynamic shear stresses of mineral mixtures, reduces the plastic strength of mixtures in the initial period and shortens the setting time, providing a balance between deceleration and strength development due to the directional formation of consolidated supramolecular calcium silicate structures that structure the cement matrix. It was found that silicon dioxide nanoparticles, which are part of a complex organic and mineral additive, do not affect the rheological properties of the system in the initial period, unlike Aerosil particles, which increase the limiting dynamic shear stress of the mixture, due to the high particle dispersion.

Keywords: *rheology, structure formation, mineral suspensions, complex additives, nanomodification, silicon dioxide*

For citation: Starchenko S.A., Poluektova V.A., Shapovalov N.A., Kozhanova E.P. Rheological properties and structure formation of a mineral suspension with a complex organic and mineral additive. Chemical Bulletin. 2024. 7 (4). P. 48 – 63. DOI: 10.58224/2619-0575-2024-7-4-48-63

The article was submitted: July 2, 2024; Approved after reviewing: September 3, 2024; Accepted for publication: October 12, 2024.

Введение

Наномодифицирование минеральных суспензий с использованием органических и органо-минеральных модификаторов представляет собой перспективное направление в строительной химии и материаловедении. Эти добавки оказывают значительное влияние на свойства суспензий, улучшая их реологические характеристики, повышая устойчивость к агрегации частиц и ускоряя структурообразование [1]. Органические и органо-минеральные модификаторы активно взаимодействуют с поверхностью минеральных частиц, образуя стабильные дисперсные системы. Это позволяет создавать более долговечные и прочные материалы с высокой степенью тиксотропии, что особенно важно в контексте новых технологий строительства, таких как 3D-печать и аддитивное производство [2].

Реология определяет поведение суспензий в процессе перекачки, экструзии и формования, определяя такие параметры, как пластичность, вязкость и тиксотропия. Изменяя эти характеристики возможно оптимизировать технологические процессы и обеспечить более оптимальное структурообразование материала. Основным методом регулирования реологических свойств является введение различных химических добавок, таких

как суперпластификаторы, которые улучшают текучесть смесей и прочностные свойства готовых изделий, влияя при этом на процессы структурообразования и сроки твердения [3].

Процессы формирования внутренней структуры цемента при его взаимодействии с водой, приводящие к его затвердеванию и набору прочности обуславливают этапы структурообразования. Этот процесс является ключевым для обеспечения механических свойств и долговечности бетонных материалов. Структурообразование можно регулировать различными способами, включая использование химических добавок, изменение водоцементного отношения, температурные условия и режимы перемешивания [4].

Основные этапы структурообразования цементной смеси включают гидратацию цемента, образование гелей и кристаллов, рост и слияние кристаллов, а также затвердевание и набор прочности [5]. Гидратные продукты, такие как гель гидратов силиката кальция и гидроксида кальция, формируют первичную структуру цементного камня, соединяя частицы цемента и заполняя поры в смеси [6]. С течением времени кристаллы гидратных фаз продолжают расти и укрупняться, создавая более плотную и прочную сеть, что способствует увеличению механической прочности и

долговечности цементного камня, повышает общую стойкость и надежность материала, что делает его более устойчивым к внешним воздействиям и нагрузкам [7].

Целью данной работы являлось исследование реологических свойств и процессов структурообразования в высококонцентрированных минеральных суспензиях, модифицированных комплексной органоминеральной добавкой на основе флороглюцинфурфурольного олигомера и частиц диоксида кремния нанодиапазона.

Материалы и методы исследований

В качестве исследуемых добавок использовали следующие материалы: органический модификатор на основе флороглюцинфурфурольных олигомеров [8] (далее индивидуальная добавка), синтезированный органоминеральный модификатор на основе флороглюцинфурфурольных олигомеров с наночастицами диоксида кремния [9] (далее комплексная органоминеральная добавка), а также для сравнения использовали смесь органического модификатора на основе флороглюцинфурфурольных олигомеров с частицами Аэросила (далее индивидуальная добавка с Аэросилом).

В качестве минеральной дисперсной фазы для изучения реологических свойств и структурообразования использовали Новороссийский бездобавочный портландцемент 500-Д0-Н с удельной поверхностью частиц равной $376 \text{ м}^2/\text{кг}$. Химический состав, мас. %: $\text{CaO} - 66,1$; $\text{SiO}_2 - 21,9$; $\text{Al}_2\text{O}_3 - 5,2$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 - 4,4$; $\text{MgO} - 0,8$; $\text{SO}_3 - 0,5$.

Размеры частиц диоксида кремния в добавках определяли методом лазерной дифракции света на приборе Malvern Mastersizer 3000 и методом динамического рассеивания света на приборе Microtrac S3500.

Реологические свойства суспензий определяли с помощью коаксиально-цилиндрического ротационного вискозиметра безредукторного типа «Реотест-2.1». Водоцементное соотношение для суспензий подбирали по расплыву миниконуса в соответствии с методикой НИИЖБ [10]. Для сравнения реологических свойств суспензий, готовили смеси без добавки и с добавками: индивидуальной добавкой, комплексной органоминеральной добавкой и индивидуальной добавки с Аэросилом. В минеральные суспензии вводили одинаковую концентрацию флороглюцинфурфурольного олигомера равную 0,2% по сухому веществу. Концентрация частиц диоксида кремния в комплексной органоминеральной добавке и в индивидуальной добавке с Аэросилом составляла 3 мг/мл. При приготовлении минеральных суспензий добавки вводили в воду затворения, после чего смешивали с минеральной дисперсной фазой и тщательно перемешивали.

Исследуемые смеси загружали в цилиндр прибора и изменяли скорость вращения коаксиального шпинделя с $0,33 \text{ с}^{-1}$ до 146 с^{-1} и по полученным показаниям определяли зависимость между напряжением сдвига и скоростью сдвига. На основе собранных данных строили полные реологические кривые смесей.

Для анализа реологических кривых применяли модернизированные закон Бингама, где $(\tau = \tau_0 + \eta_{\text{пл}}\dot{\gamma} + C\dot{\gamma}^2)$ и степенной закон, где $(\tau = \tau_0 + k \cdot \dot{\gamma}^n)$. Расчеты выполняли в программе Excel, используя метод интерполяции для анализа данных и построения трендовых линий.

Сроки схватывания и процесс структурообразования смесей определяли с помощью прибора Вика. Готовили смеси с постоянным водоцементным соотношением 0,35 без добавки и с добавка-

ми: индивидуальной добавкой, комплексной органо-минеральной добавкой и индивидуальной добавки с Аэросилом. Замеры глубины проникновения иглы в смеси производили каждые 10 минут. Начало схватывания фиксировали с момента взаимодействия цемента с водой до того момента, когда игла не доходила до основания прибора на 2-4 мм. Конец схватывания определяли как время, за которое игла погружалась в смесь не более чем на 1-2 мм от его поверхности, указывая на завершение этапа формирования структуры.

Пластическую прочность смесей определяли с помощью конического пластометра Ребиндера. Для этого исследуемую цементную смесь помещали в чашку диаметром 100 мм, сразу опускали туда конус прибора с углом при вершине 45°. Нагрузка на конус была постоянна (470 грамм). Измеряли глубину погружения конуса через каждые 60 минут в течение 3 часов. Пластическую прочность (Pm) смесей рассчитывали по формуле:

$$Pm = K_{\alpha} \cdot \frac{F}{h^2},$$

где K_{α} – константа конуса для угла $\alpha=45^{\circ}$;

F – сила, необходимая для погружения конуса;

h – площадь контакта конуса с цементным тестом.

Прочность на сжатие цементного камня определяли на образцах в виде куба с длинной ребер 2х2х2 см. Образцы твердели в формах во влажных условиях на протяжении 24 часов, после чего образцы извлекали из форм и хранили при комнатных условиях для проведения испытаний. Испытание проводили на автоматическом гидравлическом прессе «ПГМ-100МГ4» от СКБ «Стройприбор» в возрасте 1, 3, 7, 14 и 28 суток.

Результаты и обсуждения

Для определения модальных размеров частиц в исследуемых добавках на первом этапе работы получали объемное распределение частиц диоксида кремния в индивидуальной добавке с Аэросилом и в комплексной органо-минеральной добавке (рис. 1).

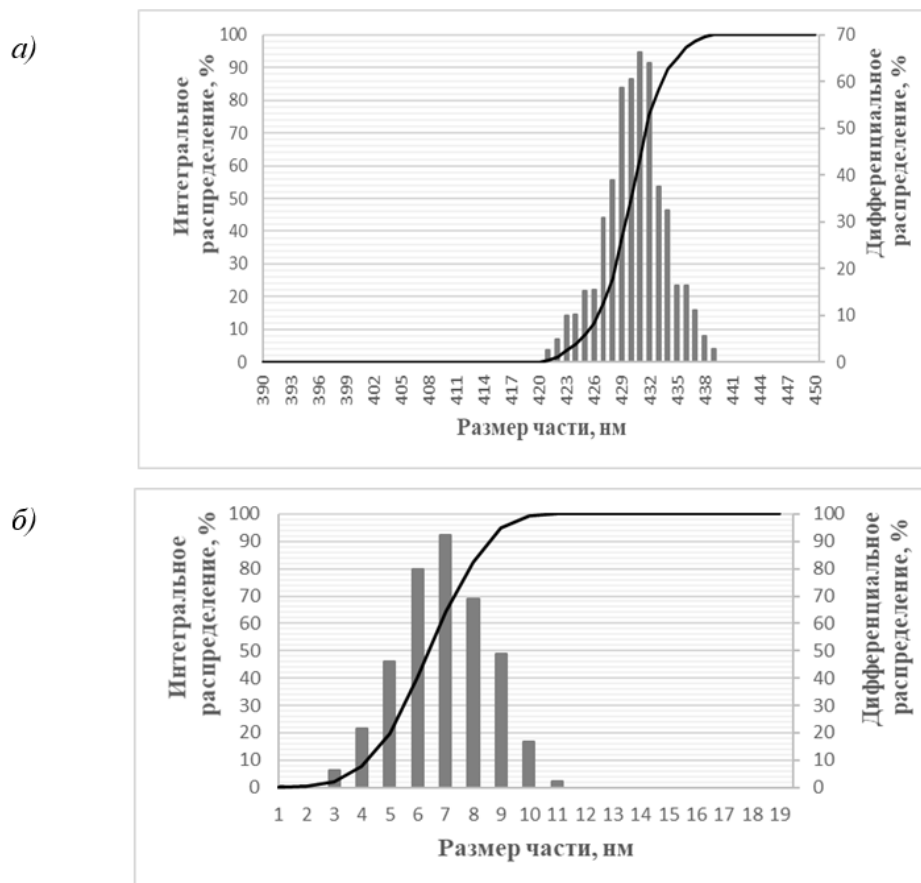


Рис. 1. Кривые объёмного распределения частиц диоксида кремния: а) в индивидуальной добавке с Аэросилом; б) в комплексной органоминеральной добавке.

Fig. 1. Volumetric distribution curves of silicon dioxide particles: а) in an individual additive with Aerosil; б) in a complex organomineral additive.

Результаты определения размеров частиц показали, что в индивидуальной добавке с Аэросилом (рис. 1 а) средний размер частиц диоксида кремния составлял 430 нм, а в комплексной органоминеральной добавке (рис. 1 б) средний размер частиц диоксида кремния составлял 7 нм.

В процессе исследования реологических свойств минеральных суспензий определили, что

суспензии представляли собой типичные вязкопластичные модели, при модифицировании которых наблюдался переход от структурированного к ньютоновскому режиму течений. Исходя из полученных данных на ротационном вискозиметре строили полные реологические кривые (зависимость значения напряжения сдвига от градиента скорости сдвига) представленные на рис. 2.

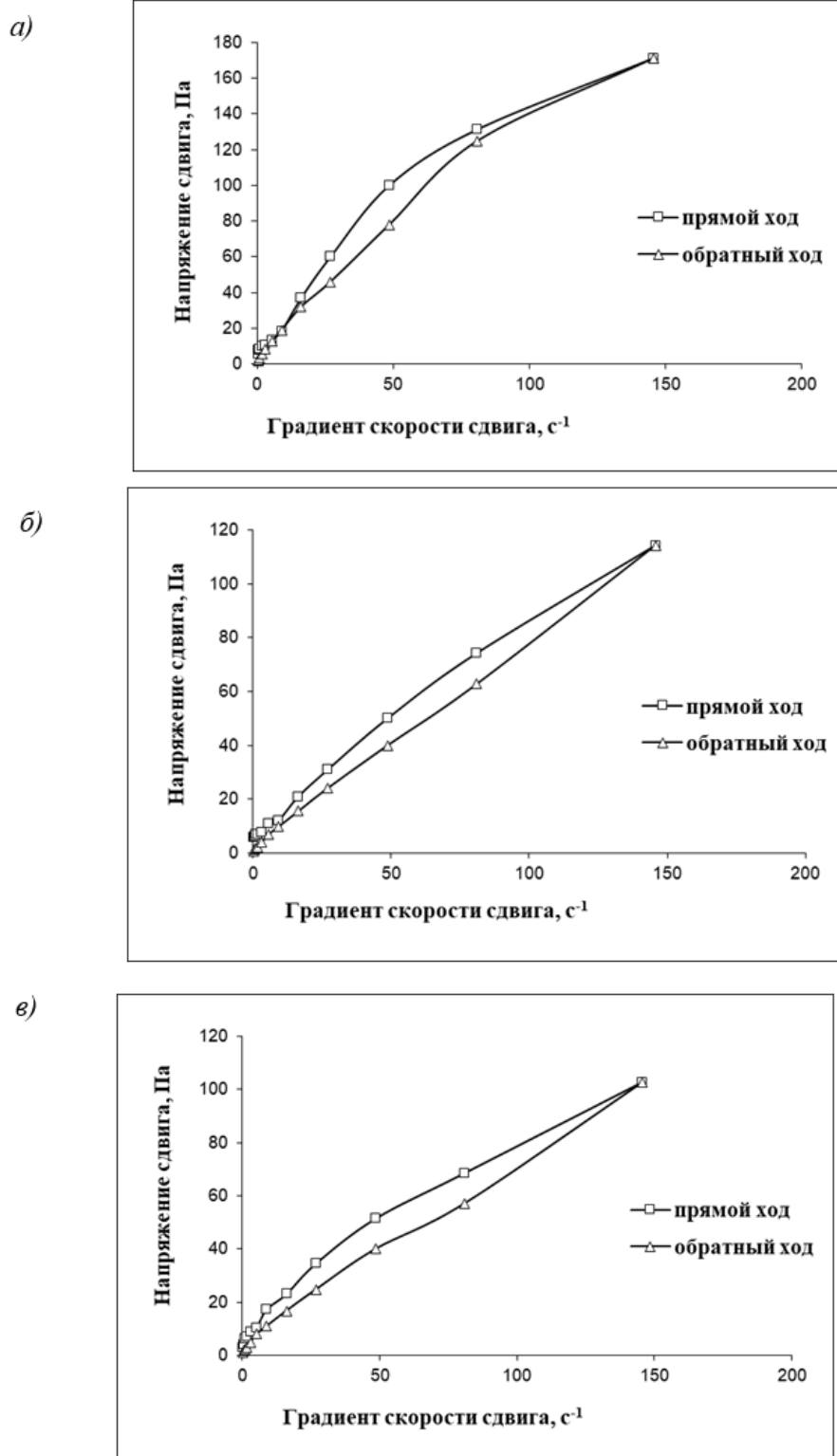


Рис. 2. Полные реологические кривые минеральных суспензий: а) без добавки; б) с индивидуальной добавкой; в) с комплексной органоминеральной добавкой; г) с индивидуальной добавкой и Аэросилом.

Fig. 2. Complete rheological curves of mineral suspensions: a) without additives; б) with individual additives; в) with complex organomineral additives; г) with individual additives and Aerosil.

По реологическим кривым определяли предельное динамическое напряжение сдвига, ре-

зультаты представлены на рис. 3, и величину пластической вязкости (рис. 4).

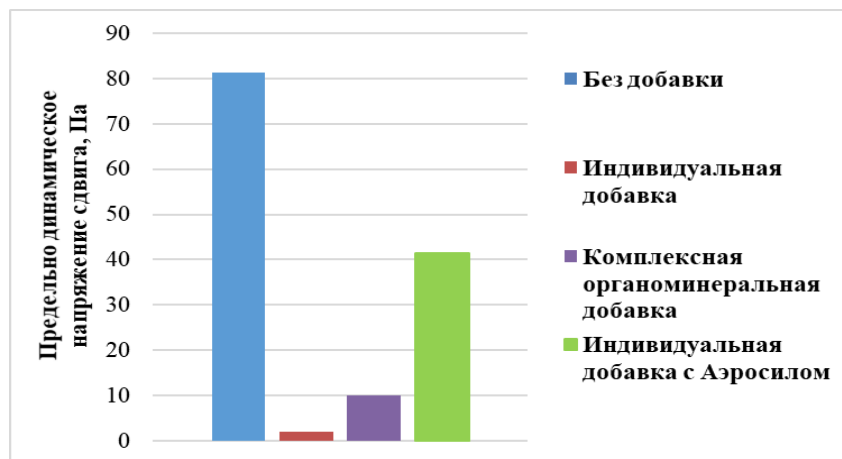


Рис. 3. Влияние добавок на предельное динамическое напряжение сдвига минеральных смесей.

Fig. 3. Effect of additives on the ultimate dynamic shear stress of mineral mixtures.

Пределно динамическое напряжение сдвига цементной смеси без добавки соответствует 81 Па. При добавлении к цементу раствора индивидуальной добавки с концентрацией 0,2% по сухому веществу предельно динамическое напряжение сдвига снижается до 2 Па. Цементная смесь с добавлением комплексной органоминеральной добавки с концентрацией флороглюцинофурфурольного олигомера 0,2% по сухому веществу и с концентрацией наночастиц диоксида кремния 3 мг/мл имеет предельно динамическое напряжение сдвига равное 10 Па. В тоже время при добавлении к цементной смеси индивидуальной добавки с концентрацией флороглюцинофурфурольного олигомера 0,2% по сухому веществу и частиц Аэросила с концентрацией 3 мг/мл предельно динамическое

напряжение сдвига возрастает до 41 Па, при этом смесь становится менее подвижной.

Пластическая вязкость цементной смеси без добавки равна 1,7 Па·с. При добавлении к цементу раствора индивидуальной добавки с концентрацией 0,2% по сухому веществу пластическая вязкость снижается до 1,0 Па·с. Введение в цемент комплексной органоминеральной добавки с концентрацией флороглюцинофурфурольного олигомера 0,2% по сухому веществу и с концентрацией наночастиц диоксида кремния 3 мг/мл позволяет снизить пластическую вязкость до 0,9 Па·с. В тоже время при введении индивидуальной добавки с частицами Аэросила аналогичной концентрации пластическая вязкость возрастает до 1,1 Па·с, что обусловлено высокой дисперсностью частиц Аэросила.

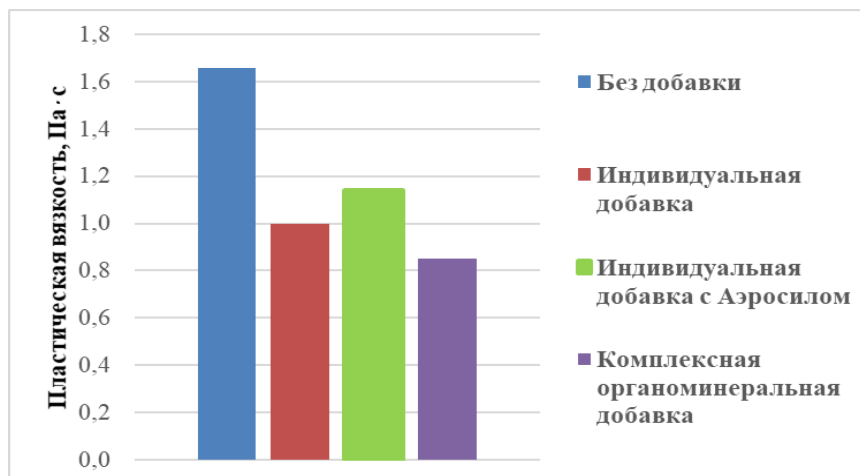


Рис. 4. Влияние добавок на пластическую вязкость минеральных смесей.

Fig. 4. The influence of additives on the plastic viscosity of mineral mixtures.

Реологический анализ показал, что все смеси обладают тиксотропными свойствами и во всех модифицированных минеральных суспензиях наблюдается переход режима течения от ярко выраженного вязко-пластичного ближе ньютоновскому, так введение добавок с флороглюцинфурфурольным олигомером приводит к снижению предельного динамического напряжения сдвига и пластической прочности. Следует отметить, что используемые частицы диоксида кремния с разным размером по разному влияют на реологические свойства системы. В комплексной органоминеральной добавке частицы диоксида кремния имели средний размер 7 нм и, как видно из гистограммы (рис. 3), предельное динамическое напряжение сдвига незначительно увеличилось по срав-

нению с индивидуальной добавкой, а в смеси индивидуальной добавки с Аэросилом, где частицы Аэросила имели размер 430 нм напротив повышают предельное динамическое напряжение сдвига по сравнению с индивидуальной добавкой. Увеличение предельного динамического напряжения сдвига, как правило, связано с повышением удельной поверхности частиц и как следствие, увеличением энергии контакта между частицами в суспензии.

В процессе исследования влияния добавок на структурообразование минеральной суспензии определяли сроки схватывания цементных смесей при постоянном водоцементном отношении, результаты которых представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сроки схватывания цементных смесей при постоянном водоцементном отношении с разными добавками.

Table 1

Setting times of cement mixtures at a constant water-cement ratio with different additives.

Параметр	Без добавки	Индивидуальная добавка	Комплексная органо-минеральная добавка	Индивидуальная добавка с Аэросилом
Начало схватывания, через, мин	180	378	350	205
Конец схватывания, через, мин	288	552	489	284

Результаты исследования показали, что начало схватывания смеси с индивидуальной добавкой происходит на 378 минуте, а с комплексной органо-минеральной добавкой на 350 минуте, в то время как при использовании индивидуальной добавки с Аэросилом цементная смесь начинает схватываться на 205 минуте. Показано, что индивидуальная и комплексная органо-минеральная добавки увеличивают индукционный период твердения цементной смеси.

Удлиненный индукционный период твердения цементной смеси значительно влияет на её структурообразование. В течение этого периода происходит гидратация цемента и начало формирования структуры. Более продолжительный индукционный период способствует формированию более однородной микроструктуры за счет создания новых центров кристаллизации и равномерного роста кристаллических фаз. Это повышает тиксотропность смеси и влияет на конечные прочностные характеристики цементного камня.

Ранее было доказано [11-12], что процесс замедления схватывания обусловлен адсорбцией флороглюцинфурфурольных олигомеров на негидратированных частицах цемента, а также на продуктах их гидратации.

На рис. 5 представлено время схватывания цементных смесей (дельта между началом и концом схватывания) при введении разных добавок. Время схватывания цементной смеси оказывает значительное влияние на структурообразование цементного камня. Начало схватывания обусловлено формированием коагуляционной структуры высококонцентрированной суспензии. Длительность индукционного периода позволяет смеси оставаться удобоукладываемой, обеспечивая время для перекачки и экструзии. Конечное время схватывания обозначает переход к формированию конденсационно-кристаллизационной структуры, сопровождающийся быстрым набором прочности.

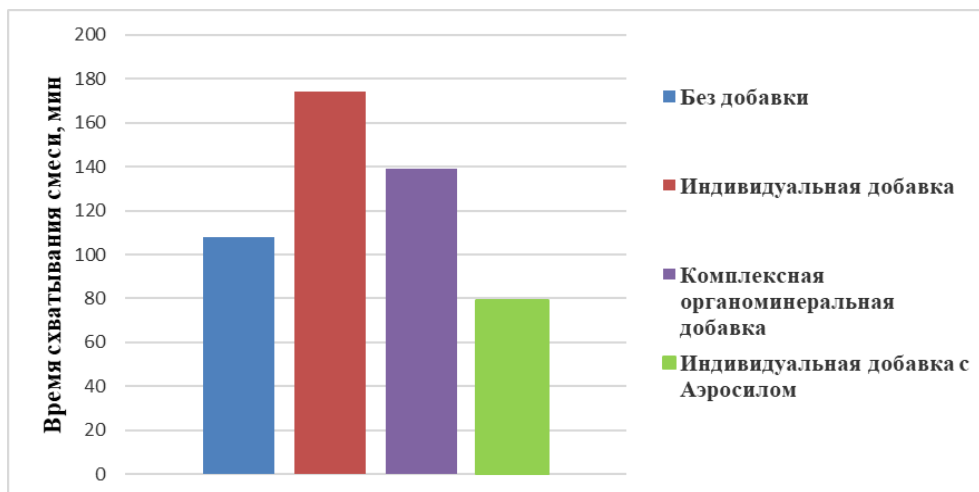


Рис. 5. Влияние добавок на время схватывания цементных смесей.

Fig. 5. Effect of additives on the setting time of cement mixtures.

Исходя из результатов видно, что время схватывания цементной смеси существенно зависит от состава используемых добавок. Время схватывания контрольного бездобавочного состава составляет 108 минут, так как процесс идет в стандартных условиях, определяемых типом и видом цемента, и водоцементным отношением. При добавлении индивидуальной добавки время схватывания увеличивается до 174 минут, так как она замедляет процесс гидратации цемента на начальной стадии за счёт адсорбции флороглюцинфурфурольных олигомеров на исходных негидратированных минералах.

Комплексная органоминеральная добавка замедляет схватывание до 139 минут, обеспечивая баланс между замедлением процессов гидратации и ускорением перехода формирования конденсационно-кристаллизационной структуры за счет введения в систему дополнительных центров кри-

сталлизации и направленного формирования консолидированных надмолекулярных структур силиката кальция, которые структурируют цементную матрицу.

В случае использования индивидуальной добавки и Аэросила, время схватывания сокращается до 79 минут. Аэросил, будучи аморфным и пирогенным диоксидом кремния, действует как ускоритель схватывания, ускоряя структурное образование цементного камня и увеличивая площадь взаимодействия между частицами, что ускоряет гидратацию на ранних сроках.

Для изучения влияния добавок на пластическую прочность смесей готовили минеральные суспензии без добавки и с добавками, после чего рассчитывали пластическую прочность. На рисунке 6 представлена кинетика изменения пластической прочности цементных смесей.

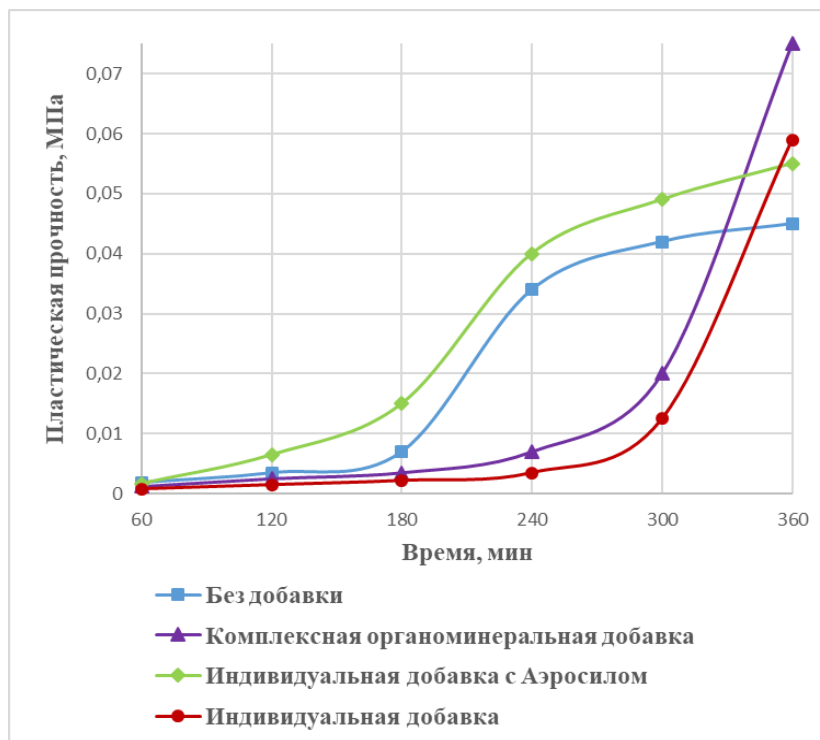


Рис. 6. Кинетика изменения пластической прочности цементных смесей.

Fig. 6. Kinetics of changes in plastic strength of cement mixtures.

Пластическая прочность цементной смеси без добавки на начальной стадии равняется 0,0019 МПа, а через 360 минут соответствует 0,045 МПа. Пластическая прочность смеси с индивидуальной добавкой и Аэросилом на начальной стадии равняется 0,0017 МПа, а через 360 минут соответствует 0,051 МПа. Пластическая прочность для смесей с индивидуальной добавкой и комплексной органоминеральной добавкой на начальной стадии равняется 0,0008 МПа и 0,0012 МПа соответственно, а через 360 минут соответствует 0,054 МПа и 0,071 МПа соответственно. Показано, что в смесях с

индивидуальной добавкой и комплексной органоминеральной добавкой наблюдается и подтверждается индукционный период твердения, что коррелируется с данными по срокам схватывания (табл. 1).

В процессе исследования влияния добавок на прочность цементного камня в воду затворения вводили добавки, после чего смешивали их с минеральной дисперсной фазой и тщательно перемешивали. Отформовывали образцы в виде куба с длинных ребер 2х2х2 см. На рис. 7 представлена кинетика набора прочности цементного камня от вводимых добавок.

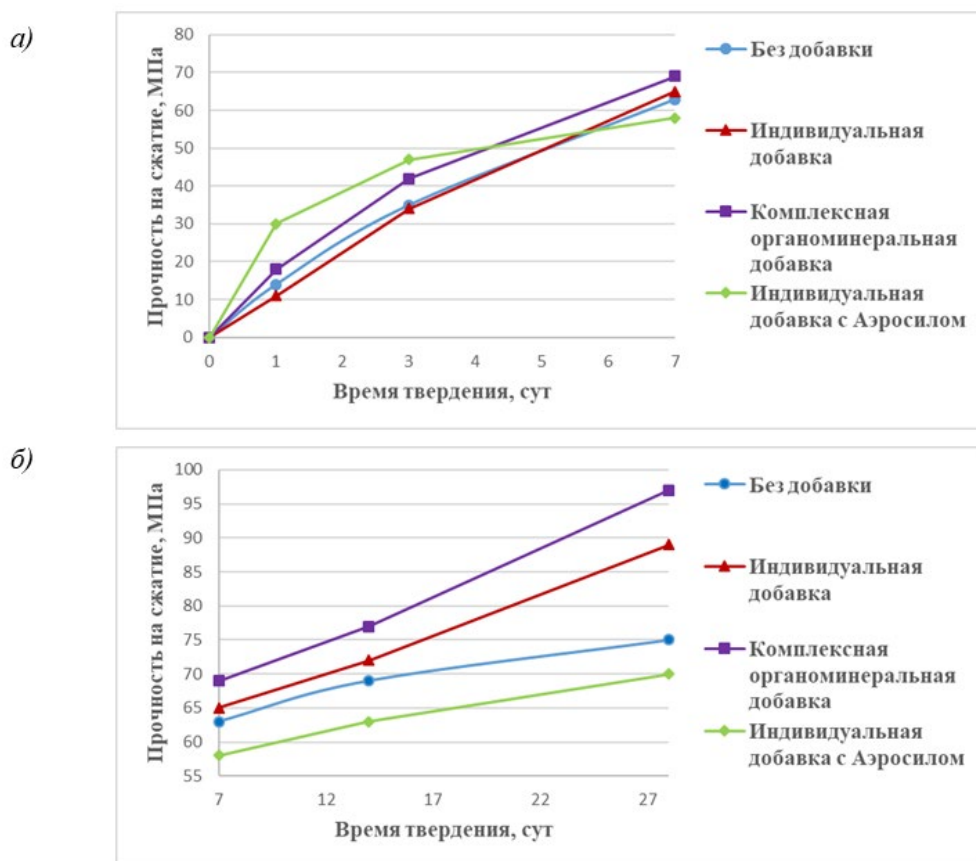


Рис. 7. Кинетика набора прочности цементного камня от вводимых добавок в возрасте от 1 сутки до 7 суток (а) и от 7 суток до 28 суток (б).

Fig. 7. Kinetics of strength gain of cement stone from introduced additives at the age from 1 day to 7 days (a) and from 7 days to 28 days (b).

Результаты показали, что при введении в суспензию индивидуальной добавки с концентрацией 0,2% по сухому веществу, ранняя прочность камня уменьшилась на 21% по сравнению с цементным камнем без добавки, ввиду того, что часть добавки адсорбировалась на образованных кристаллах и затрудняла их дальнейший рост, при этом марочная прочность цементного камня увеличилась на 19%.

При введении в суспензию комплексной органоминеральной добавки с концентрацией флороглюцинфурфурольного олигомера 0,2% по сухому веществу и с концентрацией наночастиц диоксида кремния 3 мг/мл ранняя прочность цементного

камня возросла на 29 % по сравнению с цементным камнем без добавки, а марочная прочность увеличилась на 35%. При введении в суспензию смеси индивидуальной добавки с Аэросилом с концентрацией флороглюцинфурфурольного олигомера 0,2% по сухому веществу и с концентрацией частиц Аэросила 3 мг/мл, ранняя прочность камня увеличилась на 114%, а марочная прочность камня снизилась на 7%.

Выводы

Установлено, что комплексная органоминеральная добавка снижает предельное динамическое напряжения сдвига цементных смесей на 88% по сравнению со смесями без добавок. Показано,

что в сравнении с индивидуальной добавкой предельное динамическое напряжения сдвига практически не изменяется. Наночастицы диоксида кремния, входящие в состав комплексной органо-минеральной добавки, не влияют на реологические свойства системы в начальный период в отличие от частиц Аэросила, которые увеличивают предельное динамическое напряжения сдвига смеси из-за размера частиц.

Установлено, что комплексная органо-минеральная добавка сокращает срок схватывания до 139 мин, обеспечивая баланс между замедлением и развитием прочности цементной матрицы. В случае использования индивидуальной добавки и Аэросила, время схватывания сокращается до 79 мин ввиду того, что Аэросил является аморфным диоксидом кремния, который действует как уско-

ритель схватывания, ускоряя гидратацию на ранних сроках.

Доказано, что добавление комплексной органо-минеральной добавки к цементной смеси уменьшает пластическую прочность в начальный период, благодаря чему появляется возможность дополнительно снижать количество воды затворения, тем самым регулируя сроки схватывания смеси и прочностные характеристики цементного камня.

Установлено, что комплексная органо-минеральная добавка, обладая высокой пластифицирующей и водоредуцирующей способностью, позволяет получать пластическую прочность минеральных смесей около 0,07 МПа, требуемую для аддитивных технологий.

Финансирование

Исследование выполнено в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова

Список источников

1. Шаповалов Н.А., Полуэктова В.А. Особенности синтеза наномодификаторов на основе трифункциональных оксифенолов для минеральных суспензий // Нанотехнологии в строительстве. 2016. Т. 8. № 5. С. 100 – 115. DOI: [dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2016-8-5-100-115](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2016-8-5-100-115)
2. Мухаметрахимов Р.Х., Зиганшина Л.В. Технология и контроль качества строительной 3D-печати // Известия КГАСУ. 2022. № 1 (59). С. 64 – 79. DOI: [10.52409/20731523_2022_1_64](https://doi.org/10.52409/20731523_2022_1_64)
3. Neville Adam M. Properties of Concrete / University of California : Pearson, 2017. 846 p.
4. Scrivener K.L., Nonat A. Hydration of cementitious materials, present and future // Cement and Concrete Research. 2011. Т. 7. № 41. P. 651 – 665.
5. Thomas J.J., Biernacki J.J., Bullard J.W., Bishnoi S., Dolado J.S., Scherer G.W., Luttge, A. Modeling and simulation of cement hydration kinetics and microstructure development // Cement and Concrete Research. 2011. Vol. 12. № 41. P. 1257 – 1278.
6. Flatt R.J., Schober I. Superplasticizers and the rheology of concrete // In Understanding the Rheology of Concrete. 2012. № 1. P. 144 – 208.

7. Hewlett Peter Lea's Chemistry of Cement and Concretet. Ed Butterworth-Heinemann. UK: Elsevier, 2003. 1092 p.
8. Полуэктова В.А. Регулирование реологических свойств и агрегативной устойчивости водных минеральных суспензий суперпластификатором на основе флороглуцинфурфурольных олигомеров: дис. ... канд. техн. наук. Белгород: БГТУ, 2006. 162 с.
9. Комплексная добавка для бетонов строительной 3D-печати: пат. 2806395 Рос. Федерация / Полуэктова В.А., Старченко С.А., Кожанова Е.П.; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. Заявка № 2023113979; заявл. 29.05.2023; опубли. 31.10.2023, Бюл. № 31.
10. Рекомендации по физико-химическому контролю состава и качества суперпластификатора С-3. М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1984. 56 с.
11. Полуэктова В.А., Шаповалов Н.А., Балятинская Л.Н. Адсорбция оксифенолфурфурольных олигомеров на дисперсных материалах // Фундаментальные исследования. 2012. № 6 (11). С. 1470 – 1474.
12. Poluektova V.A., Shapovalov N.A., Cherkashina N.I., Kozhanova E.P., Starchenko S.A. Regulation of the aggregate stability for binary polymer-mineral dispersions // Nanotechnologies in Construction. 2023. № 15 (3). P. 258 – 266. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-3-258-266>

References

1. Shapovalov N.A., Poluektova V.A. Features of the synthesis of nanomodifiers based on trifunctional oxyphenols for mineral suspensions. Nanotechnology in Construction. 2016. Vol. 8. No. 5. P. 100 – 115. DOI: [dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2016-8-5-100-115](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2016-8-5-100-115)
2. Mukhametrahimov R.Kh., Ziganshina L.V. Technology and quality control of construction 3D printing. Izvestiya KSUACE. 2022. No. 1 (59). P. 64 – 79. DOI: 10.52409/20731523_2022_1_64
3. Neville Adam M. Properties of Concrete. University of California: Pearson, 2017. 846 p.
4. Scrivener K.L., Nonat A. Hydration of cementitious materials, present and future. Cement and Concrete Research. 2011. T. 7. No. 41. P. 651 – 665.
5. Thomas J.J., Biernacki J.J., Bullard J.W., Bishnoi S., Dolado J.S., Scherer G.W., Luttge, A. Modeling and simulation of cement hydration kinetics and microstructure development. Cement and Concrete Research. 2011. Vol. 12. No. 41. P. 1257 – 1278.
6. Flatt R.J., Schober I. Superplasticizers and the rheology of concrete. In Understanding the Rheology of Concrete. 2012. No. 1. P. 144 – 208.
7. Hewlett Peter Lea's Chemistry of Cement and Concretet. Ed Butterworth-Heinemann. UK: Elsevier, 2003. 1092 p.
8. Poluektova V.A. Regulation of rheological properties and aggregate stability of aqueous mineral suspensions by superplasticizer based on phloroglucinol-furfural oligomers: dis. ... Cand. of Engineering Sciences. Belgorod: BSTU, 2006. 162 p.
9. Complex additive for concretes of construction 3D printing: patent. 2806395 Russian Federation. Poluektova V.A., Starchenko S.A., Kozhanova E.P.; applicant and patent holder BSTU named after V.G. Shukhov. Application No. 2023113979; declared 05/29/2023; published 10/31/2023, Bulletin No. 31.

10. Recommendations for physicochemical control of the composition and quality of superplasticizer S-3. Moscow: Research Institute of Reinforced Concrete of the USSR Gosstroy, 1984. 56 p.

11. Poluektova V.A., Shapovalov N.A., Balyatinskaya L.N. Adsorption of oxyphenolfurfural oligomers on dispersed materials. Fundamental Research. 2012. No. 6 (11). P. 1470 – 1474.

12. Poluektova V.A., Shapovalov N.A., Cherkashina N.I., Kozhanova E.P., Starchenko S.A. Regulation of the aggregate stability for binary polymer-mineral dispersions. Nanotechnologies in Construction. 2023. No. 15 (3). P. 258 – 266. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-3-258-266>

Информация об авторах

Старченко С.А., аспирант, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4827-8322>, email: sereja650@gmail.com

Полуэктова В.А., доктор технических наук, профессор, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8998-0698>, email: val.po@bk.ru

Шаповалов Н.А., доктор технических наук, профессор, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4624-3385>, email: shap.bstu@yandex.ru

Кожанова Е.П., аспирант, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0112-0584>, email: elizzinchenko@mail.ru

Information about the authors

Starchenko S.A., Postgraduate Student, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4827-8322>, email: sereja650@gmail.com

Poluektova V.A., Doctor of Engineering Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8998-0698>, email: val.po@bk.ru

Shapovalov N.A., Doctor of Engineering Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4624-3385>, email: shap.bstu@yandex.ru

Kozhanova E.P., Postgraduate Student, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0112-0584>, email: elizzinchenko@mail.ru