

Реологическое поведение пластифицированных цементных дисперсных систем при вибрации

Сергей Дмитриевич Епихин* , Александр Сергеевич Иноземцев 

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: epikhinsd@mgsu.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Актуальной научно-практической задачей в разработке многофункциональных строительных материалов является получение самоуплотняющихся конструкционных легких бетонов (ЛСУБ), где основная проблема – сохранение однородности при высокой текучести. Данной проблеме посвящены отечественные и зарубежные исследования. Основным акцент ставился на рецептурные факторы, влияющие на реологические и технологические свойства ЛСУБ. Сложность разработки объясняется содержанием компонентов разных плотностей. Осцилляция смеси – один из методов оценки изменения реологии цементно-минеральных систем во времени. Ранние исследования ЛСУБ на полых микросферах данным способом оценивали изменения реологических свойств при изменении концентрации пластификатора, В/Ц и дисперсности минерального заполнителя. Следующий этап исследований реологии и однородности ЛСУБ методом осцилляции – установление влияния каждого компонента в отдельно взятой группе цементно-минеральных систем, входящих в ЛСУБ. **Методы и принципы исследования.** Объект исследования – цементно-минеральные системы из разных комбинаций компонентов с постоянным соотношением их массовых частей, составляющих ЛСУБ на полых микросферах средней плотностью 1400 кг/м³. Предмет исследования – реологические свойства таких систем при осцилляции. Сравнивались пластифицированные и непластифицированные системы. Для анализа структуры исследуемых систем использовались следующие параметры: толщина водной оболочки, объем цементного теста, толщина цементного теста, коэффициент раздвижки зерен. **Результаты исследования.** Однородность цементно-минеральных паст оценена по реологической кривой, полученной осцилляционным воздействием. Кинетика изменения напряжения сдвига при осцилляции описывается различной интенсивностью, показывая преобразование структуры цементной системы во времени. Наблюдается заметное различие между изменениями реологических свойств цементных паст с пластификатором и без него. Подчеркивается значимость микрокремнезема в стабилизации бетонной смеси. **Заключение и обсуждение.** Структурный параметр – толщина водной прослойки (h_g) – не учитывает поверхностные свойства дисперсных фаз и жидкости в пластифицированных системах. Определение водопотребности компонентов ЛСУБ и роль пластификатора в этом является перспективным направлением развития темы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цементно-минеральная паста, самоуплотняющийся бетон, легкий бетон, бетон на полых микросферах, реологические свойства, напряжение сдвига, осцилляция, пластификатор, однородность, расслоение, разжижение

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

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Епихин С.Д., Иноземцев А.С. Реологическое поведение пластифицированных цементных дисперсных систем при вибрации. *Нанотехнологии в строительстве*. 2026;18(2):167–179. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-167-179>. – EDN: ZWSKDH.

Rheological behavior of plasticized cement dispersed systems under vibration

Sergey D. Epikhin* , Aleksandr S. Inozemtsev 

National Research Moscow State University of Civil Engineering, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, Russian Federation

* Corresponding author: e-mail: epikhinsd@mgsu.ru

ABSTRACT

Introduction. Obtaining self-compacting structural lightweight concretes (LWSCC) is an urgent scientific and practical task in the development of multifunctional building materials, where the main problem is to maintain uniformity with high fluidity. Russian studies and studies from other countries have been devoted to this problem. The main focus was on prescription factors that affect the rheological and technological properties of LWSCC. The content of components with different densities is the main difficulty of this development. Oscillation is one of the methods for estimating changes in the rheology of cement-mineral systems over time. Early studies of LWSCC on hollow microspheres showed changes in rheological properties with changes in the concentration of plasticizer, W/C ratio and the dispersion of the mineral aggregate. The next stage of research on the rheology and uniformity of LWSCC by the oscillation method is to establish the influence of each component in a separate group of cement–mineral systems included in LWSCC. **Methods and Materials.** The object of research is cement-mineral systems from different combinations of components in a constant ratio of their mass parts, which make up LWSCC on hollow microspheres with an average density of 1400 kg/m³. The subject of the study is the rheological properties of such systems during oscillation. Plasticized and non-plasticized systems were compared. The following parameters were used to analyze the structure of the studied systems: the thickness of the water shell, the volume of cement dough, the thickness of the cement dough, and the grain spreading coefficient. **Results and Discussion.** The kinetics of the shear stress variation during oscillation is described by varying intensity, showing the transformation of the cement system structure over time. There is a noticeable difference between the changes in the rheological properties of cement pastes with and without plasticizer. The importance of the addition of micro-silica in the stabilization of the concrete mixture is emphasized. **Conclusion.** The water thickness (h_w) is a structural parameter that does not take into account the surface properties of dispersed phases and liquids in plasticized systems. The determination of the water consumption of LWSCC components and the role of plasticizer in this is a promising direction for the development of the topic.

KEYWORDS: cement-mineral paste, self-compacting concrete, lightweight concrete, concrete on hollow microspheres, rheological properties, shear stress, oscillation, plasticizer, uniformity, delamination, liquefaction

ACKNOWLEDGEMENTS: This work is being carried out as part of the Program for the Development of the federal State Budgetary Educational institution of Higher Education "National Research Moscow State University of Civil Engineering" for 2025–2036. The work was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project № FSWG-2026-0003.

FOR CITATION:

Epikhin S.D., Inozemtsev A.S. Rheological behavior of plasticized cement dispersed systems under vibration. *Nanotechnologies in Construction*. 2026;18(2):167–179. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-167-179>. – EDN: ZWSKDH.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка полифункциональных строительных материалов является одним из признанных мировых направлений в строительстве [1–4]. К таким материалам можно отнести высокопрочные легкие бетоны, разработкой которых занимаются отечественные и зарубежные школы [5–7]. Актуальной научно-практической задачей в технологии конструкционных и высокопрочных легких бетонов является расширение области применения [8, 9], например, для применения в монолитном строительстве. Повышение удобоукладываемости высокопрочных легких бетонов, особенно достижение

их самоуплотняемости [10], при сохранении однородности представляет собой предмет для исследования таких систем.

Основной проблемой самоуплотняющихся бетонов (далее СУБ) является сохранение однородности при высокой подвижности смеси [11]. Основной акцент в исследованиях самоуплотняющихся бетонных смесей ставится на рецептурные факторы, влияющие на реологические и технологические свойства СУБ [12–14]. Ключевыми для регулирования подвижности и однородности бетонных смесей являются изменения количества воды и количества и качества пластификатора [15, 16]. Также большое значение для регулирования текучести и однородности

имеют твердые компоненты бетонных смесей. Так, в работе [17] приведены исследования по использованию отходов медеплавильного производства и нанокремнезема в литых бетонах. Результаты показали, что введение нанокремнезема в доле до 0,5% от массы цемента способствует постепенному увеличению прочности мелкозернистого бетона до 6,7%, но в то же время уменьшает пластичность смеси, которая наблюдается даже при доле добавки до 0,2% от массы цемента. Авторы предложили, что решением данной проблемы может быть увеличение доли поликарбоксилатного пластификатора без увеличения соотношения В/Ц.

Разработка самоуплотняющихся легких бетонов сталкивается с еще большими сложностями [18, 19]. Из-за содержания компонентов разных плотностей (более 1000 кг/м³ и менее 1000 кг/м³) однородность структуры подвержена риску расслоения. Поэтому для таких систем особенно важно правильно подбирать состав твердых компонентов [20]. Одним из методов оценки изменения реологии цементно-минеральных систем с течением времени является метод осцилляции смеси. Ученые из инженерной школы университета в Глазго совместно с учеными из манчестерского университета в своей статье [21] рассматривают последние достижения в области методов измерения и определения характеристик динамической и статической реологии, уплотнения или разжижения при сдвиге, вязкоупругости и тиксотропного структурного наращивания с помощью реометров в качестве измерительных инструментов.

В ранних исследованиях легких бетонных смесей на полых микросферах методом осцилляции [22] авторы производили оценку изменения реологических свойств ЛСУБ при изменении параметров: концентрации пластификатора и В/Ц. Было установлено, что кинетика изменения вязкости при осцилляции описывается различной интенсивностью, что указывает на преобразование структуры бетонной смеси. Интенсивность тиксотропного разжижения в большей степени зависит от концентрации пластификатора, чем от В/Ц отношения. Достижение высокой стабильности и низкой текучести самоуплотняющихся легких бетонных смесей на полых микросферах

находится в противоположенных диапазонах варьирования В/Ц и концентрации пластификатора, что требует поиска компромиссного рецептурного решения, основанного на достижении оптимальной структуры.

Следующий этап развития исследований рецептурных факторов влияния на реологические характеристики и однородность — это определение влияния каждого компонента в отдельно взятой группе цементно-минеральных систем, которые являются составной частью самоуплотняющихся легких бетонных смесей.

МЕТОДЫ И ПРИНЦИПЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследований были рассмотрены цементно-минеральные системы, состоящие из компонентов, входящих в состав высокопрочных легких бетонов на полых микросферах, а именно: портландцемент ЦЕМ I 42,5 (Ц), керамический микросфер ForeSphere (МС), микрокремнезем МК-85 (МКМ), фракционный песок фр. 0,16–0,63 мм (П_ф), кварцевая мука (П_м) и вода (В). Свойства компонентов представлены в таблице 1.

Цементно-минеральные системы представляли собой различные комбинации компонентов при постоянном соотношении их массовых частей относительно портландцемента, которое составило:

$$\text{Ц} : \text{МКМ} : \text{П}_m : \text{П}_\phi : \text{МС} : \text{В} = 1,00 : 0,11 : 0,09 : 0,28 : 0,40 : 0,50.$$

Вторая серия отличалась наличием гиперпластификатора Melflux 2651F (Пл) в количестве 1,4% от массы портландцемента.

Исследование реологических свойств цементно-минеральных паст осуществлялось с помощью ротационного вискозиметра MCR 101 (рис. 1) путем измерения величины напряжения сдвига при колебательном воздействии (осцилляции) датчика (измерительная система «шар» диаметром 8 мм) с частотой 15 Гц и углом отклонения 0,42° в течение 600 с. Анализ полученных зависимостей выполнялся в соответствии с методикой, описанной в [22], где

Таблица 1. Свойства компонентов исследуемых паст и бетонных смесей

| № | Компонент | Истинная плотность, ρ , кг/м ³ | Площадь удельной поверхности, $S_{уд}$, м ² /кг | Диаметр частицы, d_p , мкм |
|---|----------------|--|---|------------------------------|
| 1 | Портландцемент | 3100 | 121,6 | 15,9 |
| 2 | Микрокремнезем | 2250 | 171,2 | 15,6 |
| 3 | Кварцевая мука | 2650 | 17,3 | 130,7 |
| 4 | Фракц. песок | 2650 | 3,3 | 694,6 |
| 5 | Микросферы | 580 | 169,7 | 61,0 |



Рис. 1. Ротационный вискозиметр MCR 101 с измерительной системой «шар»

в качестве реологического параметра рассматривалась вязкость смеси. Согласно данной методике, реологическая кривая делится на 3 участка (рис. 2), каждый из которых описывается трендовой линией. Коэффициенты уравнения, описывающие участки, характеризуют поведение исследуемой системы под действием осцилляции.

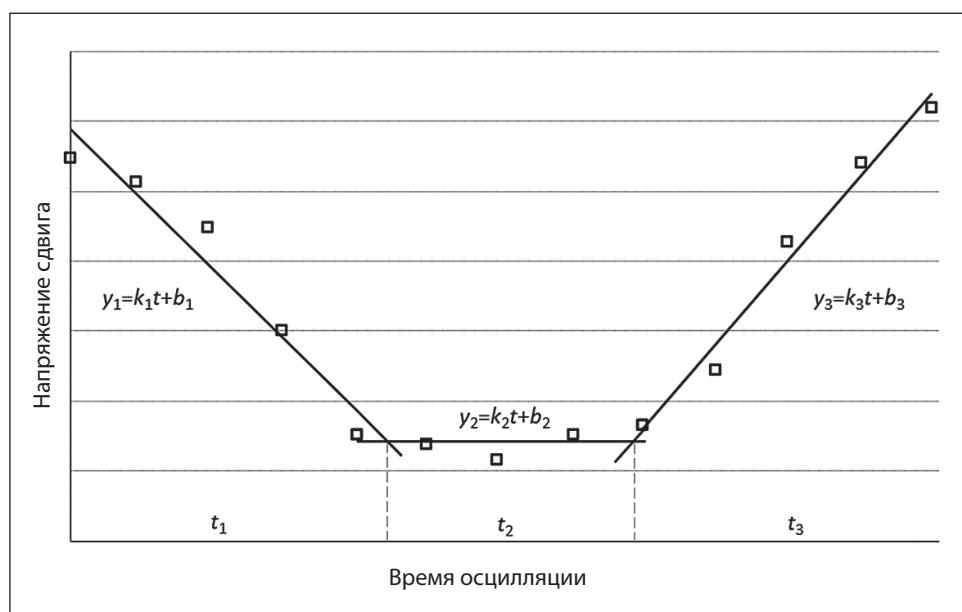


Рис. 2. Общий вид реологической кривой, полученной при осцилляции

Для анализа структуры исследуемых дисперсных систем использовались различные структурные параметры. Толщина водной оболочки h_b рассчитывается по известной формуле:

$$h_b = \frac{V_b}{S_f} = \frac{V_b}{S_{уд, f} \cdot m_f}, \quad (1)$$

где V_b – объем воды, S_f – суммарная удельная поверхность частиц, $S_{уд}$ – удельная поверхность частицы. При этом удельная поверхность может быть выражена упрощенной формулой (2) с учетом среднего диаметра частиц или с учетом вклада частиц различного размера (3):

$$S_{уд} = \frac{6}{d_f \rho_f}, \quad (2)$$

где d_f и ρ_f – диаметр и плотность частиц сухих компонентов соответственно, v – доля i -х частиц определенного диаметра. Для исследуемых смесей рассчитывались структурные параметры:

$$\frac{h_{цт}}{d_f} = \frac{v_{цт} / S_f}{d_f}, \quad (3)$$

где $v_{цт}$ и $h_{цт}$ – объем и толщина прослойки цементного теста соответственно.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

При разработке самоуплотняющихся высокопрочных легких бетонов для решения задачи паритетного сочетания высокой текучести и однородности бетонной смеси важным является установление роли каждого из его компонентов в протекании указанных процессов. Ранее в [22] предложен подход, позволяющий под действием постоянного ос-

цилляционного воздействия установить изменение реологических свойств бетонных смесей. При этом изменяющийся характер кривой течения указывает на изменения в структуре исследуемой системы. Анализ выполняется путем деления кинетической зависимости на участки, описываемые различными трендовыми линиями. Коэффициенты этих прямых

позволяют судить об интенсивности преобразования структуры исследуемых дисперсных систем.

На рисунке 3 представлены зависимости напряжения сдвига от времени при постоянном вибрационном воздействии для цементных и цементно-минеральных паст различного состава с пластификатором и без него.

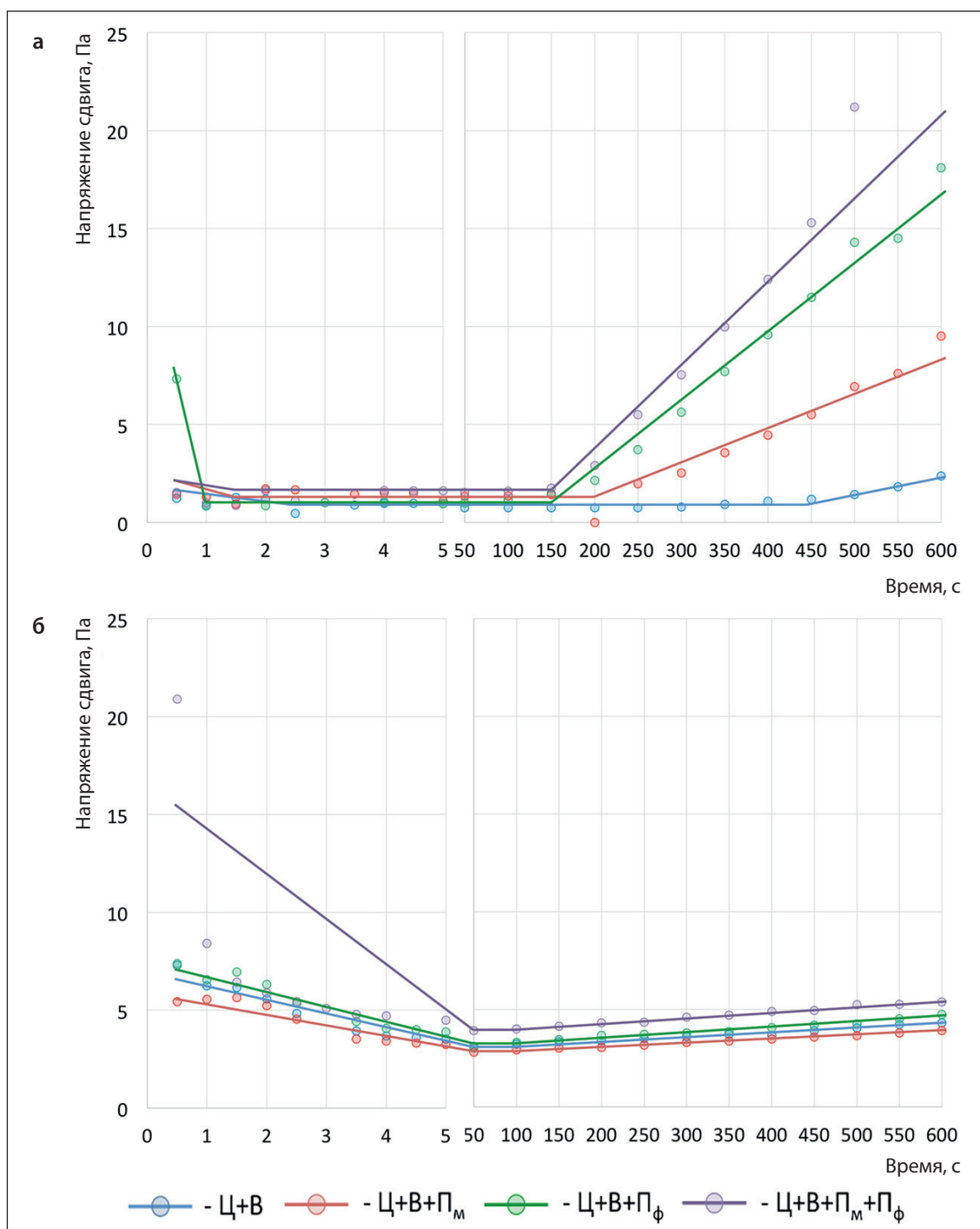


Рис. 3. Изменение напряжения сдвига цементно-минеральных паст с пластификатором (а) и без пластификатора (б) при осцилляции

На представленных графиках (рис. 3) в соответствии с методикой [22] выделены 3 участка, описываемые прямыми, коэффициенты которых представлены в таблице 2. На рис. 2 отчетливо видно существенное отличие кинетических зависимостей напряжения сдвига для пластифицированных и непластифицированных дисперсных систем. Так, для паст с пластификатором наблюдается непродолжительный (1,5...3,5 с) нисходящий участок 1, очевидно связанный с тиксотропным разжижением. Затем вибрационное воздействие не приводит к изменению напряжения сдвига. Этот участок 2 длится от 150 до 450 с, после чего фиксируется интенсивное приращение величины напряжения сдвига до значений, превышающих начальный предел текучести. Такое поведение может быть связано с переходом дисперсной системы из устойчивой коагуляционной структуры к неоднородной. То есть постоянное вибрационное воздействие приводит к нарушению однородности, например, расслоению пасты из-за сближения и формирования агрегатов плотных частиц, которые под действием силы тяжести стремятся к седиментации. При этом разбавление цементной пасты молотым или фракционированным песком сокращает участок 2.

Для исследуемых паст без пластификатора характерна другая зависимость напряжения сдвига от времени осцилляции. Так, напряжение сдвига имеет существенно большее начальное значение, что выражается более длительным участком 1. При этом начало восходящего участка 3 можно идентифицировать раньше, чем для этих же паст, но с пластификатором. А участок 2 слабо идентифицируется, что отчетливо наблюдается при анализе параметров трендовых линий, представленных в таблице 2.

Из таблицы 2 видно, что в пределах эксперимента продолжительность участка 3 для паст без пластификатора составляет 550 с, при котором приращение напряжения сдвига наступает при достижении близ-

ких значений напряжения сдвига, на что указывает $b_2 = 2,81...4,19$. При этом интенсивность приращения, описываемая k_3 , также имеет близкие значения 0,002...0,003. Подобное поведение исследуемых систем без пластификатора можно объяснить неравномерным распределением воды для смачивания частиц и отсутствием диспергирующего эффекта. Сравнительный анализ коэффициентов для каждого участка показывает роль пластификатора как в разжижении (b_1 составляет 1,38...13,8 против 6,39...26,4), так и в скорости нарушения однородности (k_3 на порядок выше) паст.

Анализ 1–4 строчки в таблице 2 показывает, что управлять реологией пластифицированных паст можно как с использованием разнодисперсных компонентов, так и с их комбинациями. Показано, что введение в пасту кварцевой муки приводит к незначительному загустеванию, но снижает продолжительность участка 2 с 450 до 250 с, то есть приводит к раннему нарушению однородности. Использование более крупных кварцевых частиц в пасте приводит к большей интенсификации описанного влияния. Большая плотность таких паст (b_1 в 10 раз больше) объясняется большим трением частиц кварцевого песка, а их размер (фр. 0,16–0,63 мм), превышающий размер как муки, так и портландцемента, способствует ускорению расслоения (k_3 увеличивается с 0,01 до 0,04). Такое влияние может быть нивелировано комбинацией Π_ϕ с Π_m . В этом случае пластифицированная паста, состоящая из портландцемента, воды и кварцевой муки, формирует прослойку между частицами фракционированного песка, снижая их трение. Однако увеличение доли кварцевых компонентов приводит к ускорению расслоения (k_3 увеличивается до 0,06) из-за снижения доли вяжущего, формирующего коагуляционную структуру исследуемой системы.

Таким образом, показано: варьирование компонентами дисперсной среды позволяет управлять реологическим поведением пасты. Снижение доли

Таблица 2. Параметры зависимостей напряжения сдвига цементно-минеральных паст от времени осцилляции

| № | Наличие пластификатора | Маркировка состава | Участок 1 | | | Участок 2 | | Участок 3 | | | |
|---|------------------------|--------------------|------------------------|-------|----------|-----------|----------|-----------|-------|----------|-----|
| | | | k_1 | b_1 | t_1, c | b_2 | t_2, c | k_3 | b_3 | t_3, c | |
| 1 | Пл | Ц+В | – | –0,25 | 1,38 | 3,5 | 0,87 | 447 | 0,01 | –2,47 | 150 |
| 2 | | | + Π_m | –0,51 | 1,74 | 1,5 | 1,48 | 248 | 0,02 | –3,77 | 350 |
| 3 | | | + Π_ϕ | –13,0 | 13,8 | 1,0 | 0,94 | 149 | 0,04 | –5,16 | 450 |
| 4 | | | + Π_m + Π_ϕ | –0,67 | 1,81 | 1,5 | 1,52 | 148 | 0,06 | –10,4 | 450 |
| 5 | – | | – | –0,85 | 7,29 | 5,0 | 3,39 | 45 | 0,002 | 2,97 | 550 |
| 6 | | | + Π_m | –0,63 | 6,39 | 5,0 | 2,81 | 45 | 0,002 | 2,70 | 550 |
| 7 | | | + Π_ϕ | –0,84 | 7,73 | 5,0 | 3,01 | 45 | 0,003 | 3,04 | 550 |
| 8 | | | + Π_m + Π_ϕ | –14,5 | 26,4 | 1,5 | 4,19 | 45 | 0,003 | 3,73 | 550 |

вяжущего за счет наполнения кварцевым песком или тонкой минеральной добавкой снижает способность таких систем сохранять однородность. Особенно это существенно на пластифицированных цементных пастах. Чем крупнее частицы дисперсной фазы, тем интенсивнее процессы расслоения.

Известно, что использование тонких минеральных добавок позволяет повысить однородность дисперсных систем за счет высокой водоудерживающей способности. Влияние микрокремнезема на график кривой напряжения сдвига цементно-минеральных паст при осцилляции показан на рисунке 4.

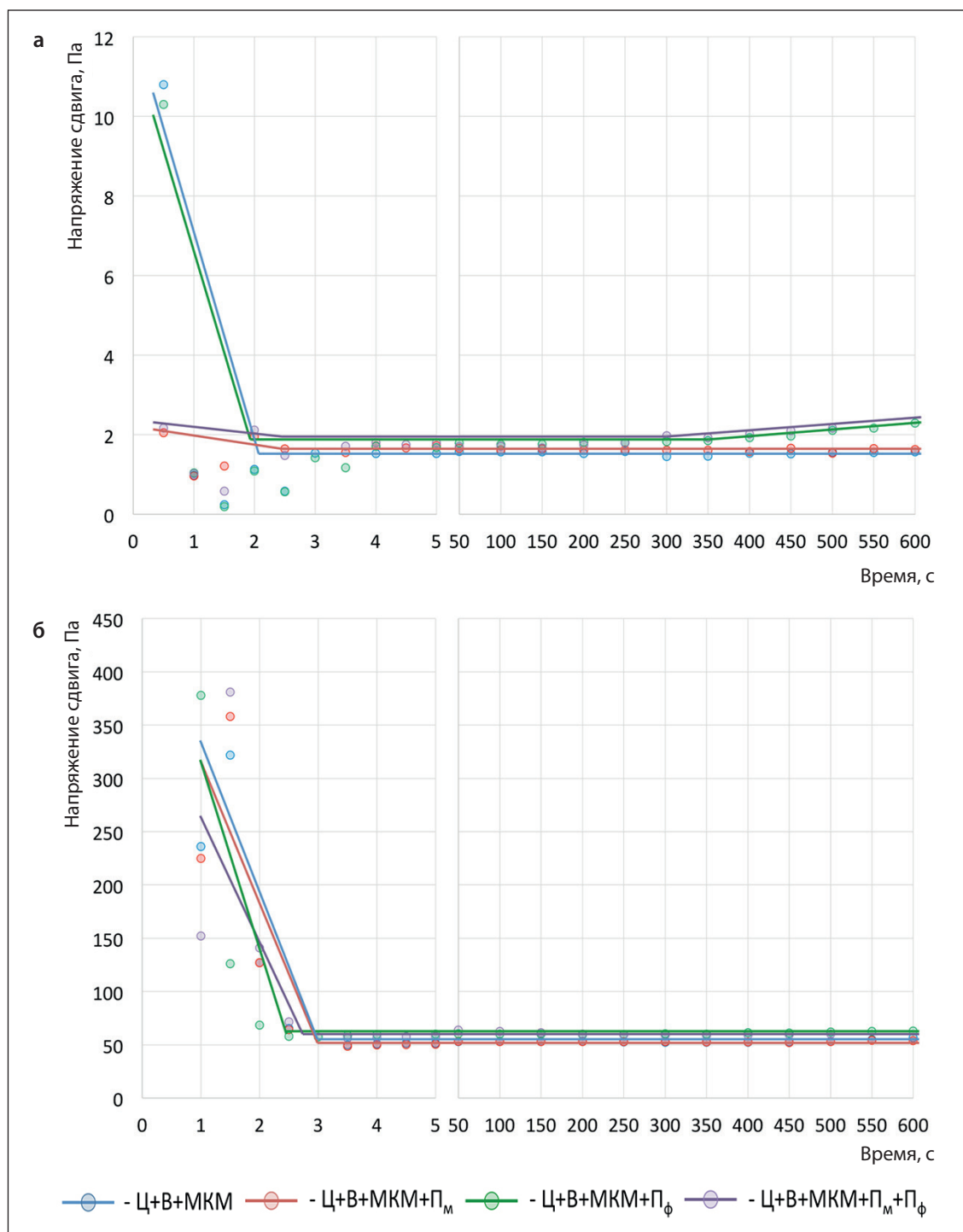


Рис. 4. Изменение напряжения сдвига цементно-минеральных паст с пластификатором (а) и без пластификатора (б) при осцилляции

Рисунок 4 показывает, что пластифицированные цементно-минеральные пасты с микрокремнеземом имеют низкую величину начального напряжения сдвига (менее 12 Па), близкую к значениям для паст без него, показанным на рис. 3 (менее 10 Па), в отличие от непластифицированных паст, где значения изменились на порядок (152...378 Па против 5,4...20,9 Па). На рис. 3б можно выделить пасты Ц+В+МКМ+П_м и Ц+В+МКМ+П_м+П_ф, несмотря на возможность выделить отдельные участки, характеризуются относительно низкой изменчивостью напряжения сдвига на протяжении всего периода осцилляционного воздействия, а именно в пределах 1,5...2,3 Па. При этом отсутствие молотого песка (синий и зеленый график на рис. 4а) в составе увеличивает величину начального напряжения сдвига. Также отметим, что системы с микрокремнеземом, с фракционированным песком (зеленый и фиолетовый график на рис. 4а) отличаются наличием восходящего участка на реологической кривой. То есть кварцевый песок выступает в качестве компонента, интенсифицирующего нарушение однородности структуры пасты. Однако для исследуемых систем интенсивность этого процесса незначительна.

Отсутствие пластификатора в исследуемых пастах с микрокремнеземом меняет особенности их реологического поведения (рис. 4б). Так, все виды паст отличаются отсутствием участка 3 в пределах продолжительности проводимого исследования. При этом разжижение вследствие осцилляционного воздействия протекает в схожих временных диапазонах (табл. 3).

Отметим, что увеличение вязкости паст за счет введения микрокремнезема отражается на интенсивности разжижения, которое наступает быстрее (через 2,5 с против 5 с). Однако такая смесь имеет более высокий коэффициент b_2 , который увеличился на порядок с 2,81...4,19 до 50,9...59,0.

Таким образом, можно сделать вывод о роли компонентов в исследуемых пастах для управления их свойствами. В пластифицированных цементно-минеральных пастах варьирование содержания кварцевой муки позволяет снизить передел текучести при сохранении однородности. Варьирование содержания крупной фракции кварцевого песка может быть использовано для управления тиксотропным разжижением цементных смесей, но следует учитывать их повышенное стремление к расслоению. Микрокремнезем позволяет стабилизировать структуру цементно-минеральных паст, в том числе пластифицированных.

Очевидно, что в исследуемых дисперсных системах на портландцементе или с кварцевым песком изменение структуры под действием вибрации будет протекать медленнее. Это связано с тем, что плотность дисперсной фазы, в качестве которой выступает фракционированный кварцевый наполнитель и дисперсионная среда (цементно-минеральная паста), имеют близкие значения. Введение полого наполнителя, такого как полые микросферы, приведет к снижению стабильности системы, стремление к расслоению которой будет наступать раньше. Однако обеспечить высокую текучесть, которой должны обладать самоуплотняющиеся бетонные смеси на полом наполнителе, без использования пластификатора, невозможно.

На рисунке 5 показано, что введение полых микросфер в пластифицированные и непластифицированные цементно-минеральные системы с микрокремнеземом способствует появлению восходящего участка кривой. Единственным составом без данного участка является Ц+В+МКМ+МС+П_м+П_ф. Также видно, что продолжительность периода стабильности больше у систем с пластификатором, где исключением является состав Ц+В+МКМ+МС+П_ф, где период сохранения однородности одинаков

Таблица 3. Параметры зависимостей напряжения сдвига цементно-минеральных паст от времени осцилляции

| № | Наличие пластификатора | Маркировка состава | Участок 1 | | | Участок 2 | | Участок 3 | | | |
|---|------------------------|--------------------|---------------------------------|--------|----------|-----------|----------|-----------|-------|----------|-----|
| | | | k_1 | b_1 | t_1, c | b_2 | t_2, c | k_3 | b_3 | t_3, c | |
| 1 | Пл | Ц+В+МКМ | – | –19,6 | 20,6 | 2,0 | 1,54 | 598 | – | | |
| 2 | | | +П _м | –2,17 | 3,14 | 2,0 | 1,65 | 598 | – | | |
| 3 | | | +П _ф | –18,5 | 19,6 | 2,0 | 1,71 | 346 | 0,002 | 1,12 | 200 |
| 4 | | | +П _м +П _ф | –2,30 | 3,32 | 2,0 | 1,74 | 297 | 0,001 | 1,56 | 300 |
| 5 | – | | – | –141,4 | 435 | 2,5 | 51,3 | 597 | – | | |
| 6 | | | +П _м | –142,7 | 443 | 2,5 | 50,9 | 597 | – | | |
| 7 | | | +П _ф | –203,6 | 514 | 2,5 | 59,0 | 597 | – | | |
| 8 | | | +П _м +П _ф | –96,4 | 354 | 2,5 | 59,0 | 597 | – | | |

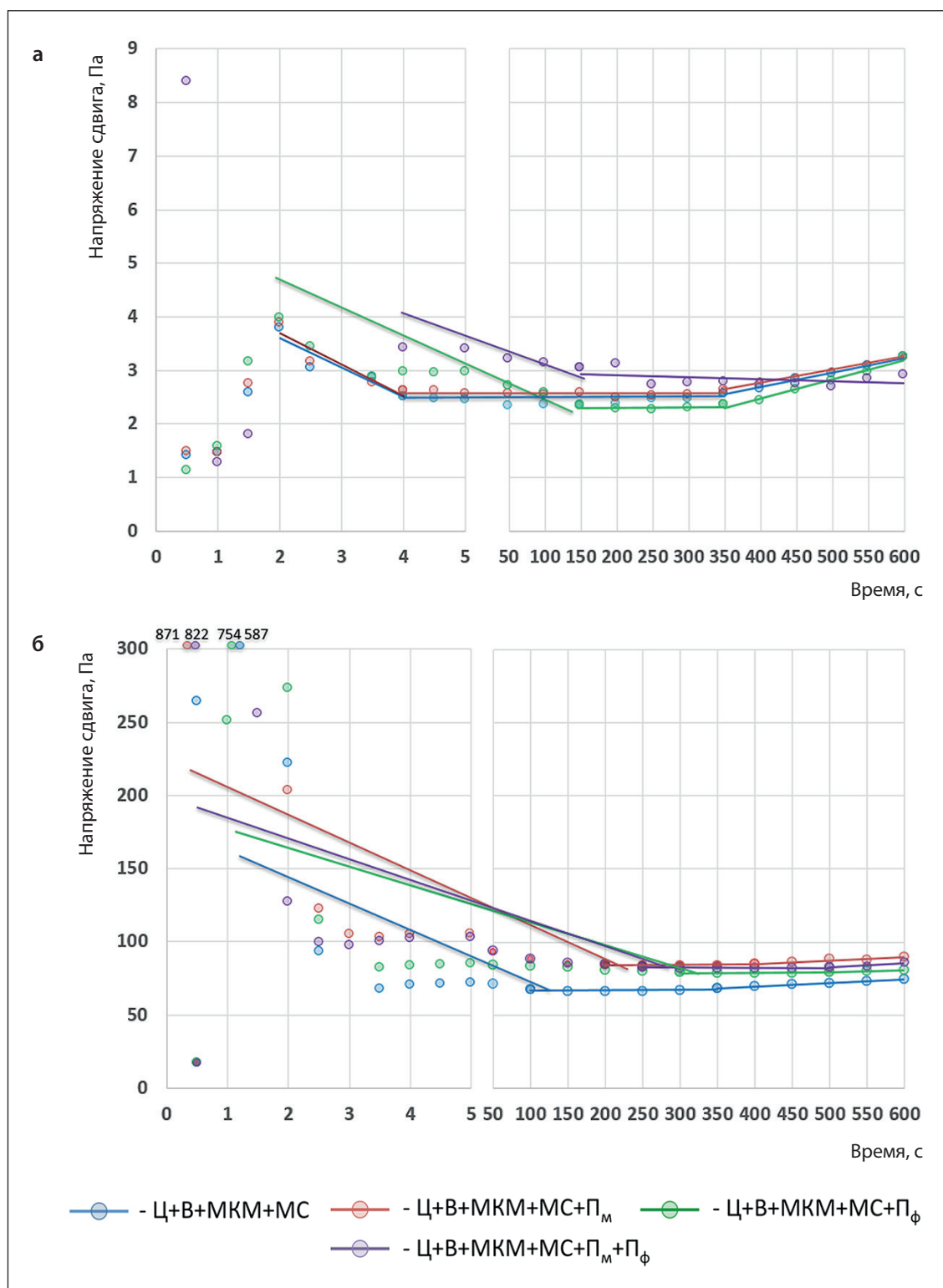


Рис. 5. Изменение напряжения сдвига цементно-минеральных паст с пластификатором (а) и без пластификатора (б) при осцилляции

с такой же по составу смесью без пластификатора. Это еще раз доказывает ранее упомянутый тезис о роли песка как компонента, интенсифицирую-

щего нарушение однородности структуры пасты. В непластифицированных системах введение кварцевого заполнителя разной дисперсности и объема

(P_m и P_ϕ) способствует смещению в большую сторону во времени начала расслоения, т.е. приводит к более позднему расслоению. В пластифицированных смесях изменение дисперсности заполнителя не приводит к изменению периода начала расслоения: участок № 3 для составов Ц+В+МКМ+МС, Ц+В+МКМ+МС+ P_ϕ , Ц+В+МКМ+МС+ P_m наступает при $t = 350$ с. Совместное введение заполнителей разной дисперсности (P_m+P_ϕ) способствует более позднему началу процесса расслоения. Для систем Ц+В+МКМ+МС+ P_m+P_ϕ в установленный период осцилляции ($t = 600$ с) момент наступления расслоения смеси не фиксируется.

Введение полых микросфер значительно меняет реологию исследуемых цементных паст с микрокремнеземом: как при использовании пластификатора, так и без. Практически все изучаемые системы с микросферами имеют участок 3 (рис. 5б) в пределах продолжительности проводимого исследования. Разжижение вследствие осцилляции протекает в схожих временных диапазонах для пластифицированных систем, кроме состава с P_m+P_ϕ , и в разных диапазонах для систем без пластификатора, где уменьшение участка 3 происходит за счет увеличения крупности кварцевого заполнителя (табл. 4).

Особенностью реологического поведения смесей на полых микросферах является наличие короткого промежутка в начальный период времени, когда под колебательным воздействием измерительной системы реометра фиксируется увеличение напряжения сдвига. Объяснение такого характера изменения и его значимость требуют дополнительного исследования.

Таким образом, установлено, что многокомпонентные дисперсные системы обладают сложным реологическим поведением. Введение легкой мелкодисперсной фазы стабилизирует систему и пре-

пятствует расслоению на определенный период времени.

Очевидно, что реологическое поведение дисперсных систем связано с формированием определенной структуры. Свойства такой структуры зависят от параметров, которые достигаются варьированием рецептурных факторов. К таким параметрам структуры для цементно-минеральных паст и бетонных смесей относят объем цементного теста, толщину водной прослойки, размеры частиц дисперсной фазы, коэффициент раздвижки зерен или расстояние между частицами дисперсной фазы и др. [5]. В таблице 5 представлены некоторые структурные параметры исследуемых смесей.

Варьирование рецептуры цементно-минеральной пасты или бетонной смеси приводит к формированию структуры, которую можно описать различным параметром. В таблице 5 это наглядно продемонстрировано. Установление зависимости реологических свойств дисперсной системы от ее параметров структуры позволит определить рецептурные факторы, позволяющие ими управлять. В таблице 6 представлены результаты корреляционного анализа реологических параметров для некоторых исследуемых дисперсных систем.

Установлено, что параметры k_1 , b_1 , b_2 систем, описывающие направление изменения напряжения сдвига при осцилляции, с пластификатором и без него, имеют хорошую корреляцию с некоторыми параметрами структуры. Из таблицы 5 видно, что в системах без пластификатора чувствительным структурным параметром, для которых характерен высокий коэффициент корреляции $|r| > 0,70$, является толщина водной прослойки, объем цементного теста и толщина цементного теста. Однако это характерно только для параметра b_2 , описывающего величину напряжения сдвига,

Таблица 4. Параметры зависимостей напряжения сдвига цементно-минеральных паст от времени осцилляции

| № | Наличие пластификатора | Маркировка состава | Участок 1 | | | Участок 2 | | Участок 3 | | | |
|---|------------------------|--------------------|----------------|--------|----------|-----------|----------|-----------|-------|----------|-----|
| | | | k_1 | b_1 | t_1, c | b_2 | t_2, c | k_3 | b_3 | t_3, c | |
| 1 | Пл | Ц+В+МКМ+МС | - | -0,55 | 4,69 | 2,0 | 2,41 | 346 | 0,003 | 1,59 | 250 |
| 2 | | | + P_m | -0,58 | 4,85 | 2,0 | 2,58 | 346 | 0,002 | 1,79 | 250 |
| 3 | | | + P_ϕ | -0,01 | 3,21 | 148 | 2,28 | 200 | 0,004 | 1,04 | 250 |
| 4 | | | + P_m+P_ϕ | -0,003 | 3,4 | 146 | 3,0 | 454 | - | - | - |
| 5 | - | Ц+В+МКМ+МС | - | -1,33 | 172,4 | 98,5 | 66,6 | 251,5 | 0,02 | 59,8 | 250 |
| 6 | | | + P_m | -1,12 | 251,4 | 199 | 83,0 | 201 | 0,02 | 75,3 | 200 |
| 7 | | | + P_ϕ | -0,53 | 195,4 | 299 | 78,8 | 201 | 0,01 | 74,0 | 100 |
| 8 | | | + P_m+P_ϕ | -0,65 | 203,8 | 249 | 82,6 | 251 | 0,03 | 66,0 | 100 |

Таблица 5. Структурные параметры цементно-минеральных паст

| № | Дисперсная | | $\Sigma S, \cdot 10^3 \text{ м}^2$ | $h_b, \text{ мкм}$ | $v_{\text{цт}}$ | $S_r, \cdot 10^3 \text{ м}^2$ | $h_{\text{цт}}, \text{ мкм}$ | $h_{\text{цт}}/d_f$ |
|---|------------|----------------------|------------------------------------|--------------------|-----------------|-------------------------------|------------------------------|---------------------|
| | среда | фаза | | | | | | |
| 1 | Ц+В | Π_m | 72,5 | 8,03 | 0,96 | 0,9 | 1010 | 7,72 |
| 2 | | Π_ϕ | 72,1 | 7,46 | 0,89 | 0,5 | 1653 | 2,38 |
| 3 | | МКМ | 83,1 | 6,88 | 0,94 | 11,5 | 81,8 | 5,25 |
| 4 | | МС | 111,2 | 2,98 | 0,55 | 39,7 | 13,7 | 0,23 |
| 5 | | $\Pi_m + \Pi_\phi$ | 73,0 | 7,10 | 0,85 | 1,48 | 575 | 1,39 |
| 6 | | $\Pi_m + \text{МКМ}$ | 84,0 | 6,54 | 0,91 | 12,5 | 72,6 | 0,99 |
| 7 | | $\Pi_m + \text{МС}$ | 112,2 | 2,88 | 0,53 | 40,6 | 13,1 | 0,14 |
| 8 | | МКМ+ Π_ϕ | 83,6 | 6,10 | 0,84 | 12,0 | 69,7 | 0,20 |
| 9 | | МКМ+МС | 122,7 | 2,61 | 0,53 | 51,2 | 10,3 | 0,27 |

Таблица 6. Коэффициент корреляции между структурными и реологическими параметрами

| Параметр | С пластификатором | | | | Без пластификатора | | | |
|----------|-------------------|-----------------|-----------------|---------------------|--------------------|-----------------|-----------------|---------------------|
| | h_b | $v_{\text{цт}}$ | $h_{\text{цт}}$ | $h_{\text{цт}}/d_f$ | h_b | $v_{\text{цт}}$ | $h_{\text{цт}}$ | $h_{\text{цт}}/d_f$ |
| k_1 | -0,35 | -0,40 | -0,11 | -0,17 | -0,33 | -0,50 | 0,42 | 0,09 |
| b_1 | 0,17 | 0,23 | 0,03 | 0,09 | 0,18 | 0,37 | -0,54 | -0,15 |
| b_2 | -0,91 | -0,88 | -0,72 | -0,56 | -0,28 | -0,09 | -0,68 | -0,35 |

соответствующую предельному разжижению смеси. Однако для дисперсных систем с пластификатором наибольший коэффициент корреляции наблюдается между $h_{\text{цт}}$ и b_2 , что указывает на некорректность их использования для рассматриваемых смесей и параметров.

Таким образом, показано, что распространенные структурные параметры, используемые для описания дисперсных систем, имеют ограниченную применимость. Так, для густых смесей выбранные структурные параметры могут быть использованы для оценки интенсивности разжижения, а для текучих смесей – для оценки предельной величины разжижения. Однако стоит отметить, что ни один из указанных структурных параметров, рассчитанных по известным рецептурным формулам, не учитывает вклад пластификатора. То есть и распределение воды (h_b), и объем цементного теста ($v_{\text{цт}}$), который от него зависит, для системы с пластификатором и без него представляется идентичным структурным параметрам. В связи с этим для пластифицированных дисперсных систем, таких как бетонные смеси самоуплотняющихся бетонов, требуются параметры, учитывающие роль пластификатора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных исследований установлено, что пластифицированные многокомпонентные дисперсные системы обладают сложным реологическим поведением, которое указывает на особенности формирования структуры в присутствии ПАВ. Показано, что наполнение цементных систем более крупными компонентами снижает способность таких паст сохранять однородность. Большая доля тонких компонентов, таких как кварцевая мука или микрокремнезем, повышают однородность как пластифицированных, так и непластифицированных цементно-минеральных систем. Установлено, что полые микросферы существенно меняют реологию цементных паст, выраженную повышенной склонностью к расслоению. Корреляционный анализ показал некорректность использования традиционных структурных параметров дисперсных систем для описания их свойств, особенно с пластификатором. Традиционно применяемые параметры структуры (например, толщина водной прослойки или толщина прослойки цементного теста) не учитывают свойства дисперсных фаз и жидкости в системе. Это указывает на необходимость поиска таких критериев.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Батяновский Э.И., Бондарович А.И., Калиновская Н.Н., Рябчиков П.В. Самоуплотняющийся бетон и технология бетонирования фундаментного массива с использованием 9000 кубических метров бетона. *Наука и техника*. 2021;20;4:329–337. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-329-337>
2. Ларсен О.А., Бахрах А.М., Машина Т.Ю. Органоминеральный модификатор на основе шламовой воды для получения высокопрочных самоуплотняющихся бетонов. *Техника и технология силикатов*. 2024;31;4:365–376. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2024-365-376> – EDN: MJUPXW.
3. Тараканов О.В., Ерофеева И.В., Белякова Е.А., Москвин Р.Н., Санягина Я.А., Христофорова И.А. Моделирование процессов раннего структурообразования и твердения цементных материалов с органическими добавками. *Нанотехнологии в строительстве*. 2024;16;6: 510–524. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-6-510-524> – EDN: QQDQLS.
4. Калашников В.И., Тараканов О.В., Кузнецов Ю.С., Володин В.М., Белякова Е.А. Бетоны нового поколения на основе сухих тонкозернисто-порошковых смесей. *Инженерно-строительный журнал*. 2012;8(34):47–53. <https://doi.org/10.5862/MCE.34.7> – EDN: PJWLHF.
5. Иноземцев А.С., Королёв Е.В., Доунг Т.К. Структурная модель течения пластифицированных цементно-минеральных смесей. *Строительные материалы*. 2020;4-5:90–96. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-90-96> – EDN: CVBCCH.
6. Al-Khaiat H., Naque M.N. Effect of initial curing on early strength and physical properties of a lightweight concrete. *Construction and Building Materials*. 1998.28.6:859–866 [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00051-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00051-9) – EDN: ABJIXX
7. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Карпенко Н.И., Селютин Н.М., Моисеенко Г.А., Безгодов И.М. Прочностные и деформационные характеристики высокопрочных самоуплотняющихся легких бетонов на искусственных и природных пористых заполнителях. *Бетон и железобетон*. 2025;3(628):52–68. [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3\(628\)-52-68](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3(628)-52-68) – EDN: SWWFTR.
8. Zhang Y.H., Wang H., Zhong W.L., Fan L.F. Development of a high-strength lightweight geopolymer concrete for structural and thermal insulation applications. *Case Studies in Construction Materials*. 2024; 21: e03949. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03949>
9. Иноземцев А.С., Королев Е.В. Легкие бетоны на полых и пористых заполнителях. *Строительные материалы*. 2024;7:41–47. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-826-7-41-47> – EDN: UNEDCX
10. Inozemtcev A.S., Epikhin S.D. The effect of dense and hollow aggregates on the properties of lightweight self-compacting concrete. *Materials*. 2024;17;18:4569. <https://doi.org/10.3390/ma17184569> – EDN: SPPCRB.
11. Dengwu J., Caijun Sh., Qiang Y., Xiaopeng A., Yu L., Huang L. Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete—A review. *Cement and Concrete Composites*. 2017;83:146–159. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.07.016>
12. Lee S. H., Kim H. J., Sakai E., Daimon M. Effect of particle size distribution of fly ash–cement system on the fluidity of cement pastes. *Cement and Concrete Research*. 2003;33;5:763–768. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01054-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01054-2)
13. Miguel C.S. Nepomuceno, L.A. Pereira-de-Oliveira, Sandrine F. Pereira. Mix design of structural lightweight self-compacting concrete incorporating coarse lightweight expanded clay aggregates. *Construction and Building Materials*. 2018;166:373–385. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.161>
14. Biricik Ö., Mardani A. Parameters affecting thixotropic behavior of self-compacting concrete and 3D printable concrete; a state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*. 2022; 339: 127688. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127688>
15. Епихин С.Д., Иноземцев А.С. Реологические свойства самоуплотняющихся легких бетонных смесей на полых микросферах. *Строительство: наука и образование*. 2024;14;1:18–24. <https://doi.org/10.22227/2305-5502.2024.1.9>
16. Городецкий И.Ю., Сердюченко В.М. Особенности использования самоуплотняющегося бетона. *The scientific heritage*. 2021;72-2(72):3–5. <https://doi.org/10.24412/9215-0365-2021-72-2-3-5> – EDN: G GKADP.
17. Кравцов А.В., Цыбакин С.В., Евсеева Т.М., Соболев К.Г., Потапов В.В. Литые бетоны с использованием отходов меде плавильного производства и нанокремнезема. *Вестник МГСУ*. 2017;12;9(108):1010–1018. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.9.1010-1018> – EDN: ZHKODZ.
18. Kim Y. J., Choi Y. W., Lachemi M. Characteristics of self-consolidating concrete using two types of lightweight coarse aggregates. *Construction and Building Materials*. 2010;24;1:11–16. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.004>

19. Wu Z., Zhang Y., Zheng J., Ding Y. An experimental study on the workability of self-compacting lightweight concrete. *Construction and Building Materials*. 2009;23(5):2087-2092. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.08.023>
20. Behnam V., Shami N. Mix design of light-weight self-compacting concrete. *Case Studies in Construction Materials*. 2016;4:1-14. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2015.10.002>
21. Peng Y., Unluer C. Advances in rheological measurement and characterization of fresh cement pastes. *Powder Technology*. 2023;429:118903. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118903>
22. Епихин С.Д., Иноземцев А.С. Однородность самоуплотняющихся лёгких бетонных смесей на полых микросферах. *Техника и технология силикатов*. 2025;32;4:369-379. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2025-369-379> – EDN: OQZMLA.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии, основанные на искусственном интеллекте.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Епихин Сергей Дмитриевич – аспирант, преподаватель, кафедра строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация, epikhinsd@mgsu.ru, <https://orcid.org/0009-0004-0193-1904>

Иноземцев Александр Сергеевич – доктор технических наук, доцент, доцент кафедры строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация, InozemcevAS@mgsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7807-688X>

ВКЛАД АВТОРОВ

Епихин С.Д. – выполнение экспериментальных работ; подготовка текста статьи; формулирование выводов.

Иноземцев А.С. – научное руководство; постановка цели и задач исследования; анализ и экспертиза результатов; формулирование выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 01.02.2026; одобрена после рецензирования 20.03.2026; принята к публикации 02.04.2026.