

Оригинальные статьи

DOI: <https://doi.org/10.17308/kcmf.2020.22/3059>

ISSN 1606-867X

Поступила в редакцию 23.09.2020

eISSN 2687-0711

Принята к публикации 08.10.2020

Опубликована онлайн 25.12.2020

УДК 691.32:544.774

Развитие представлений о реологическом поведении строительных смесей с учетом фрактально-кластерных процессов при их структурообразовании

© 2020 А. А. Леденев^a, В. Т. Перцев^b, О. Б. Рудаков^b, Д. Е. Барабаш^a

^aВоенный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж), ул. Ст. Большевиков, 54а, Воронеж 394064, Российская Федерация

^bВоронежский государственный технический университет, Московский пр., 14, Воронеж 394026, Российская Федерация

Аннотация

Развитие теоретических представлений о механизме реологического поведения строительных смесей и экспериментальная оценка реологических свойств является актуальным направлением физико-химических исследований материалов. Для оценки изменений реологических свойств при варьировании состава компонентов строительных смесей важным является применение количественных показателей, характеризующих микроструктуру смесей. Выявление закономерностей формирования гетерогенных микроструктур позволяет оценить их взаимосвязь с реологическими свойствами строительных смесей на макроуровне. Целью работы является обсуждение итогов реализации методологических подходов, теоретического моделирования и экспериментальной оценки количественных показателей реологических свойств типичных строительных смесей.

Методология экспериментальных исследований основана на оценке реологических свойств гетерогенных дисперсных систем (ГДС) с учетом фрактально-кластерных проявлений в их микрогетерогенной составляющей. Эксперимент проводили на модельных ГДС, содержащих компоненты строительных смесей. Реологические свойства определяли методом ротационной вискозиметрии при варьировании составов ГДС. Для количественной оценки структурно-реологических свойств и выявления закономерностей их изменения от состава смесей применяли показатель фрактальности D , который определяли методом математического моделирования.

Проанализированы модельные представления о реологическом поведении строительных смесей. Показано, что имеющиеся реологические модели упруго-вязко-пластичной среды не дают полного описания процессов формирования и разрушения микроструктуры концентрированных ГДС – строительных смесей. Проведена экспериментальная оценка влияния свойств частиц твердой фазы на изменение структурно-реологических характеристик ГДС с учетом фрактально-кластерных принципов их структурообразования.

Уточнены представления о механизме реологического поведения строительных смесей, в которых учтены процессы формирования и разрушения фрактально-кластерных образований в микроструктуре ГДС. Показано, что показатель фрактальности D может выступать в качестве одной из количественных характеристик структурно-реологических свойств. Установлена взаимосвязь фрактальности D с другими экспериментальными реологическими характеристиками – предельным напряжением сдвига и эффективной вязкостью. Полученные результаты могут использоваться для регулирования реологических свойств и оптимизации технологических процессов производства строительных материалов и изделий.

Ключевые слова: гетерогенные дисперсные системы, реологические свойства, строительные смеси, моделирование, фрактально-кластерные структуры.

✉ Леденев Андрей Александрович, e-mail: ledenoff@mail.ru

✉ Рудаков Олег Борисович, e-mail: robi57@mail.ru



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Леденев А. А., Перцев В. Т., Рудаков О. Б., Барабаш Д. Е. Развитие представлений о реологическом поведении строительных смесей с учетом фрактально-кластерных процессов при их структурообразовании. Конденсированные среды и межфазные границы. 2020;22(4): 473–480. DOI: <https://doi.org/10.17308/kcmf.2020.22/3059>

For citation: Ledenev A. A., Pertsev V. T., Rudakov O. B., Barabash D. E. Development of ideas about the rheological behaviour of building mixtures taking into account fractal-cluster processes in their structure formation. *Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granitsy* = *Condensed Matter and Interphases*. 2020;22(4): 473–480. DOI: <https://doi.org/10.17308/kcmf.2020.22/3059>

1. Введение

Определение реологических свойств является важной задачей при проведении физико-химических исследований структуры строительных материалов. От реологических свойств зависят параметры технологических процессов в строительной индустрии. Так, для растворных и бетонных смесей их реологические свойства определяют условия технологии перемешивания, транспортирования, формования и уплотнения, они в конечном итоге влияют на физико-технические характеристики готовых изделий и конструкций [1–21].

В настоящее время при производстве строительных растворов и бетонов расширяется ассортимент и компонентный состав сырьевых материалов с повышенной дисперсностью и концентрацией твердой фазы. Применяются многокомпонентные составы с тонкомолотыми минеральными добавками, поверхностно-активными веществами, органоминеральными добавками, наноразмерными частицами и др. [2–19]. Нашли применение высокоподвижные и самоуплотняющиеся смеси с такими реологическими характеристиками, которые обеспечивают сохранение структуры при транспортировании и в тоже время высокую текучесть при формовании изделий [2, 3, 9–11]. Рассматриваемые смеси являются многокомпонентными, многофазными гетерогенными дисперсно-зернистыми системами. Сложность исследования их структуры предопределяет применение эмпирических подходов, основанных на варьировании рецептурно-технологических факторов и оценке изменения реологических свойств без учета внутренних сил и межфазных взаимодействий. Для изучения взаимосвязи структуры и свойств эффективным является реализация методологического подхода, основанного на моделировании структуры в виде многоуровневой иерархической системы. Такой подход позволяет описать процессы и явления, реализующиеся на различных масштабных уровнях и этапах формирования структуры бетонов. На раннем этапе коагуляционного структурообразования в масштабе коллоидных и микрогетерогенных частиц на микро- и мезоуровнях структуры бетонных смесей (10^{-8} – 10^{-3} м) проявляются внутренние силы.

В такой системе на границе раздела и в объеме фаз «дисперсная фаза – дисперсионная среда» определяющими являются физико-химические процессы межчастичного и межфазного взаимодействия. В результате проявления молекулярно-электростатических и капиллярно-пленочных сил характерным является формирование фрактально-кластерных структур, самоподобных на различных масштабных уровнях [22].

Формирование и разрушение агрегированных фрактально-кластерных структур оказывает существенное влияние на проявление внутри- и межпоточных взаимодействий, характеризующихся изменением реологических свойств [22]. Это предопределяет необходимость исследований и разработок, направленных на развитие положений реологии концентрированных смесей. Для рассматриваемых систем проявление реологических свойств зависит от дисперсности частиц твердой фазы, формы частиц и шероховатости поверхности, концентрации твердой фазы и др. Выявление закономерностей формирования фрактально-кластерных образований позволяет оценить взаимосвязь структурных изменений со свойствами дисперсий. При этом важную роль играет применение количественной оценки структурно-реологических свойств с учетом фрактально-кластерных проявлений и зависимость их изменения от свойств частиц твердой фазы.

Для анализа сложных для непосредственного наблюдения самоорганизующихся процессов необходима реализация новых научно-практических подходов. Одним из таких подходов, по нашему мнению, является оценка реологических свойств строительных смесей с учетом характерных фрактально-кластерных проявлений на микрогетерогенном уровне. Комплексное применение теоретических положений реологии гетерогенных дисперсных систем, фрактальной геометрии, статистической физики, а также математического моделирования становится эффективной методологией в расширении представлений о процессах формирования и разрушения структуры строительных материалов на микроуровне.

Таким образом, целью работы является реализация методологических подходов моделирования и экспериментальной оценки реологиче-

ских свойств строительных многокомпонентных смесей – минеральных паст, содержащих частицы твердой фазы различной природы, с применением количественных показателей, характеризующих процессы структурообразования, состав и свойства компонентов смесей.

2. Экспериментальная часть

Как известно, классические модели реологического поведения ГДС, в том числе многокомпонентных строительных смесей, разработаны для однородных моделей механики сплошных систем – модель Кельвина, Бингама, Ньютона и др. [23–25].

Реологическое поведение рассматриваемых систем может быть описано следующим уравнением [1, 22–25]

$$\tau = \tau_0 + \eta \cdot \dot{\epsilon}^n, \quad (1)$$

где τ – напряжение сдвига; τ_0 – предельное напряжение сдвига; η – эффективная вязкость; $\dot{\epsilon}^n$ – градиент скорости сдвига; n – показатель псевдопластичности.

Применяемые экспериментальные методы, в которых моделируется реологическое поведение строительных смесей, основаны на определении предельного напряжения сдвига τ_0 , эффективной вязкости η или комбинации данных величин [22, 26]. Эти интегральные показатели, позволяющие проводить косвенные оценки вязкоупругих характеристик строительных смесей, не достаточны для полного представления о формировании и разрушении структуры смешанных материалов. При внешних интенсивных воздействиях на дисперсии в виде паст, суспензий, пен, гелей, отдельные структурные элементы смесей, которыми являются частицы и агрегаты дисперсной фазы различной концентрации и формы, претерпевают изменения за счет переориентации, дезагрегации и др. (рис. 1) [25].

Для растворных и бетонных строительных смесей сложность экспериментальной оценки реологических свойств в методологическом отношении обусловлена структурной неоднородностью. Это связано с совмещением грубодисперсных компонентов – мелкого и крупного заполнителей, а также микрогетерогенных составляющих – вяжущего вещества, тонкодисперсных добавок. Проявление реологических свойств во многом связано с процессами формирования агрегированных фрактально-кластерных систем в микроструктуре смесей. Для исследуемых систем, существующие теоретические положения и модели являются неприменимыми для исчерпывающего описания процессов формирования и разрушения микроструктуры концентрированных обводненных дисперсных систем и смесей.

Исходя из теоретических положений [27], модель проявления реологических свойств обводненных концентрированных ГДС представлена на рис. 2. Согласно модели при напряжениях больших τ_0 , сформированная структура дисперсии в виде перколяционного фрактального кластера, разрушается на отдельные агрегаты, это сопровождается снижением эффективной вязкости η (рис. 2а, т. 1 – т. 2). Участок т. 2 – т. 3 рис. 2а соответствует разрушению межагрегатных связей, эффективная вязкость минимальна η_{\min} . С увеличением напряжений происходит полный разрыв связей, с формированием более мелких кластеров и отдельных частиц, это приводит к повышению внутреннего трения и увеличению вязкости (рис. 2а, т. 3 – т. 4). Последующее увеличение напряжений вновь приводит к снижению вязкости за счет разрыва сплошности внутри системы (рис. 2а, т. 4 – т. 5). На основании изложенных особенностей проявления свойств в микрогетерогенной составляющей важным является получение количественной оценки структурно-реологических характеристик смесей.

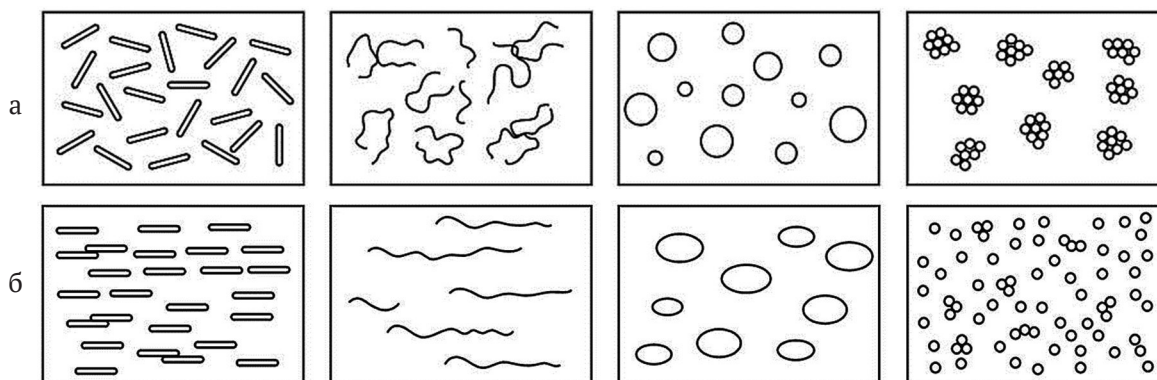


Рис. 1. Схемы моделей структуры дисперсных систем без сдвига (а) и изменения структуры при сдвиговых напряжениях (б)

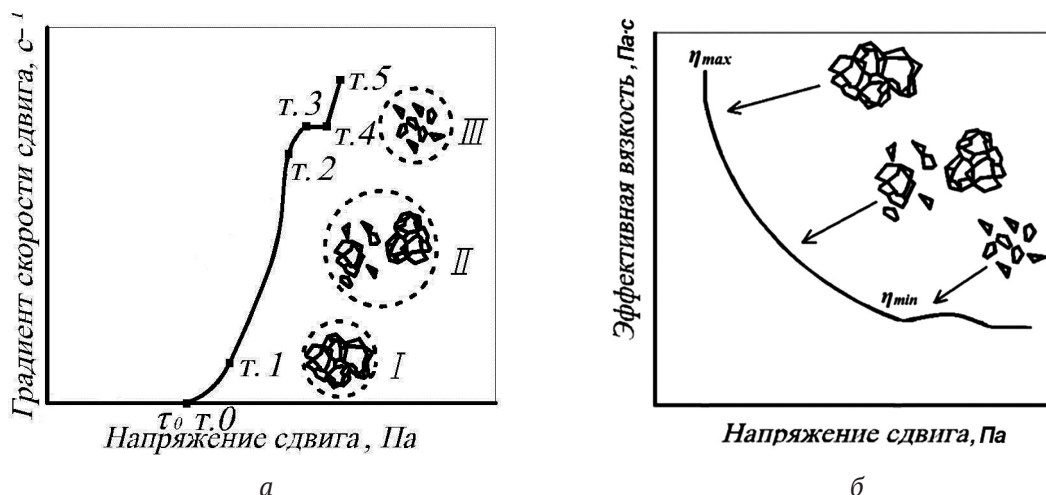


Рис. 2. Модельные реологические кривые дисперсных систем в виде зависимости градиента скорости сдвига (а) и эффективной вязкости (б) от напряжения сдвига

Эксперимент проводили на модельных ГДС – минеральных пастах, содержащих частицы твердой фазы различной природы, являющиеся компонентами типичных строительных смесей. Исследовали ГДС «цемент – вода», «песок – вода», «известняк – вода», «зола – вода». Дисперсность частиц твердой фазы составляла 300, 500, 700 м²/кг. Реологические свойства определяли с помощью метода ротационной вискозиметрии. Оценивали зависимости градиента скорости сдвига и эффективной вязкости от напряжения сдвига при варьировании составов модельных ГДС.

Для количественной оценки структурно-реологических свойств с учетом фрактально-кластерных проявлений применяли функцию [28, 29]

$$\frac{\eta(\varphi, \tau)}{\eta_0} = \frac{1 - \varphi_A}{(1 - \varphi_A / \varphi^*)}, \quad \varphi_A \approx \varphi \left[1 + \left(\frac{\tau_0}{\tau} \right)^{1/2} \right]^{3-D}, \quad (2)$$

где $\eta(\varphi, \tau)$ – эффективная вязкость; η_0 – вязкость жидкой фазы; φ_A – эффективная концентрация кластеров; τ_0 – предельное напряжение сдвига; τ – напряжение сдвига; φ – концентрация твердой фазы; φ^* – критическая концентрация кластеров; D – показатель фрактальной размерности.

Оценку формирующихся структур осуществляли по показателю фрактальной размерности D , который характеризует свойства самоподобия неоднородных, неупорядоченных объектов и систем [22]. В работе показатель D рассчитывали в ходе численного моделирования в математической программе Maple [29]. Сущность моделирования заключалась в решении математического уравнения (2) по экспериментальным данным:

$$\eta = f(\tau) \quad (3)$$

где η – эффективная вязкость; τ – напряжение сдвига.

В ходе моделирования строили графическую зависимость (рис. 3) (Fig. 3), которая при адекватном решении уравнения (2) соответствовала экспериментальной кривой.

Применение методики математического моделирования с расчетом показателя фрактальности D направлено на развитие представлений о процессах формирования агрегированных фрактальных структур обводненных дисперсий. Изучение величин D позволяет количественно охарактеризовать влияние свойств частиц твердой фазы на структурно-реологические параметры дисперсных систем.

Оптические исследования структуры обводненных дисперсных систем осуществляли с

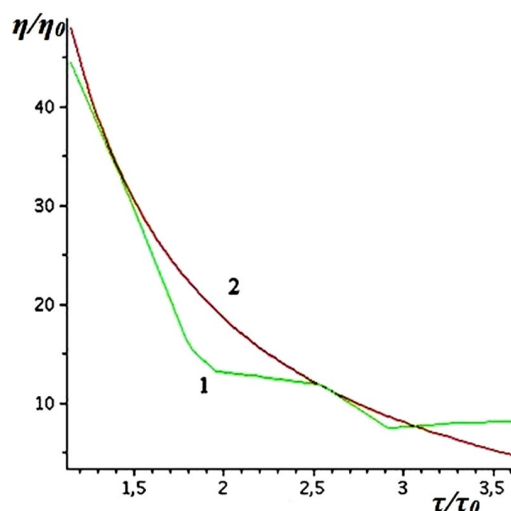


Рис. 3. Фрагмент построения реологических кривых в программе Maple: 1 – экспериментальная кривая; 2 – кривая, построенная при решении математического уравнения

помощью микроскопа Biolam D-12 (Ломо, Россия), совмещенного с цифровым фотоаппаратом (Olympus SP-500 UZ с компьютерным управлением). В качестве источника света в микроскопе использовали красный светодиод. Установка позволяла получить изображение разрешением до 300 пикс/дюйм с четким контуром при увеличении в 10 раз. Величину фрактальности D определяли с применением вышеописанной математической модели в программе Maple [29].

3. Результаты и обсуждение

Экспериментальные результаты исследования согласуются с известными теоретическими представлениями о механизме реологического поведения концентрированных ГДС (рис. 4). Выявлено наличие участков (рис. 4а, т. 2 – т. 3) с минимальной вязкостью, наблюдается увеличение вязкости при высоких напряжениях сдвига т. 3 – т. 4, с последующим ее снижением при разрыве сплошности системы т. 4 – т. 5. С практической точки зрения важно отметить, что иногда раннее проявление участка с увеличением вязкости (рис. 4а, т. 3 – т. 4) при высоких напряжениях сдвига в ходе технологических процессов,

не позволяет реализоваться участку соответствующему максимальному разжижению смесей.

Отмеченные особенности проявления реологических свойств исследованных дисперсий являются следствием гидродинамических свойств частиц и обусловлены процессами формирования и разрушения агрегированной фрактально-кластерной структуры. Это объяснение подтверждается результатами оптических исследований структуры дисперсной системы (рис. 5).

В ходе анализа и обобщения экспериментальных данных проведена оценка влияния свойств частиц твердой фазы на изменение структурно-реологических характеристик дисперсных систем. Из полученных данных (рис. 4, табл. 1) видно, что на основные реологические свойства ГДС значительное влияние оказывает вид и природа частиц твердой фазы. Предельное напряжение сдвига τ_0 варьируется в диапазоне от 26 Па (для системы «известняк – вода») до 466 Па (для системы «зола – вода»). Минимальная эффективная вязкость η_{\min} для данных систем меняется от 7 Па·с до 38 Па·с.

Установлена взаимосвязь величин фрактальности D с экспериментальными интегральными

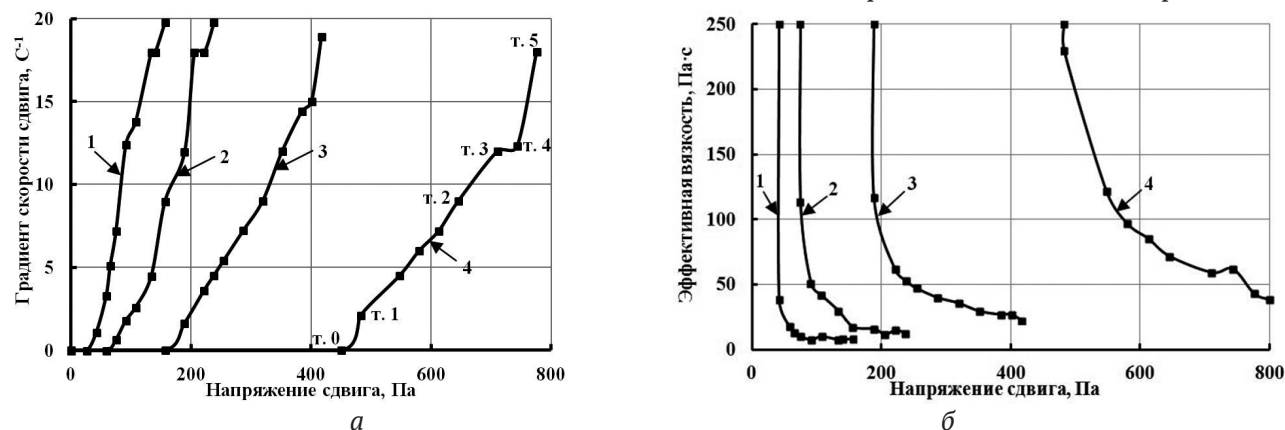


Рис. 4. Экспериментальные реологические кривые дисперсных систем в виде зависимости градиента скорости сдвига (а) и эффективной вязкости (б) от напряжения сдвига (водотвердое отношение 0,32, $S_{уд} = 500 \text{ м}^2/\text{кг}$)

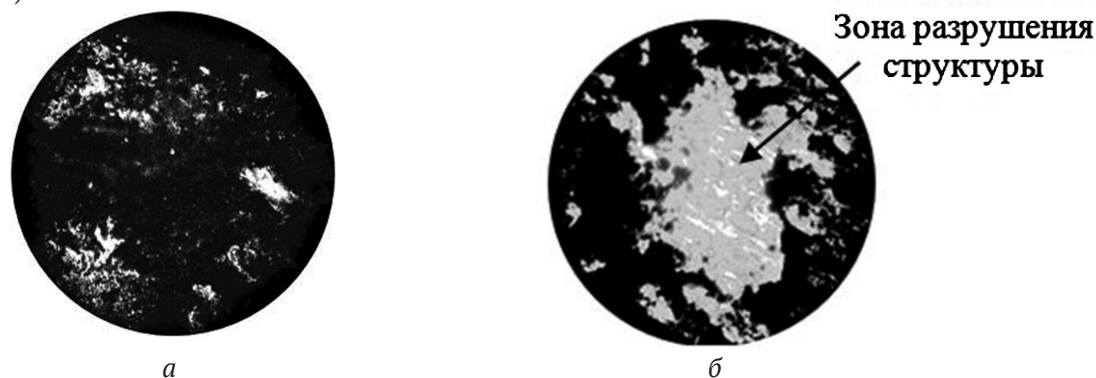


Рис. 5. Изменение структуры дисперсной системы «песок–вода» при сдвиговом воздействии $\times 10$ (водотвердое отношение 0,32, дисперсность $500 \text{ м}^2/\text{кг}$): а) система без сдвига; б) система после сдвига

характеристиками – предельным напряжением сдвига τ_0 и эффективной вязкостью η_{min} (табл. 1). Показано, что для исследованных систем с увеличением τ_0 и η_{min} отмечается снижение показателя фрактальности D . Можно предположить, что наблюдаемые взаимосвязи обусловлены свойствами частиц твердой фазы. В исследованиях [28–30] показано, частицы золы характеризуются более развитой и шероховатой внешней и внутренней поверхностью, по сравнению с другими изученными частицами. Это способствует формированию дисперсной системы с более разветвленной фрактально-кластерной структурой, в которой проявление внутренних сил обеспечивает наибольшие значения τ_0 и η_{min} с наименьшим показателем фрактальности $D = 2.31$.

Оценку влияния дисперсности частиц твердой фазы на изменение структурно-реологиче-

ских свойств проводили на примере системы «песок – вода», при постоянном водотвердом отношении $V/T = 0.28$ (рис. 6, табл. 2).

Как и предполагалось, при повышении величин дисперсности D характерным является рост τ_0 и η_{min} . Для исследованной системы при увеличении дисперсности с 300 до 700 м²/кг τ_0 повышается с 226 Па до 389 Па, η_{min} – с 21 Па·с до 31 Па·с. Эти наблюдения можно объяснить проявлением внутренних сил и изменением характера формирующихся фрактально-кластерных структур что выражается в снижении показателя фрактальности D . Таким образом, величина фрактальности D показывает, что с ростом дисперсности в обводненной системе формируется более разветвленная микроструктура, с большим количеством межчастичных и межагрегатных контактов, отличающаяся более высокой пу-

Таблица 1. Влияние вида дисперсных систем на их структурно-реологические показатели (водотвердое отношение 0.32, дисперсность 500 м²/кг)

Показатель	Дисперсная система			
	«известняк–вода»	«песок–вода»	«цемент–вода»	«зола–вода»
τ_0 , Па	26	58	156	466
η_{min} , Па·с	7	11	22	38
D	2.64	2.61	2.57	2.31

Таблица 2. Влияние дисперсности частиц твердой фазы на структурно-реологические характеристики системы «песок–вода» (при водотвердом отношении 0.28)

Показатель	Дисперсность, м ² /кг		
	300	500	700
τ_0 , Па	226	258	389
η_{min} , Па·с	21	23	31
D	2.7	2.65	2.45

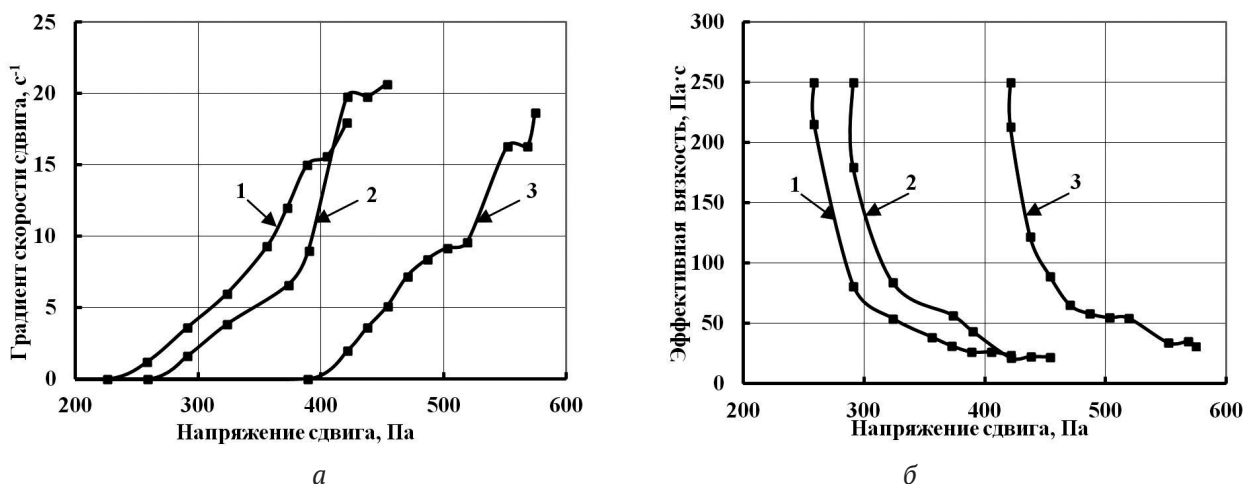


Рис. 6. Экспериментальные реологические кривые дисперсной системы «песок–вода» при водотвердом отношении 0.28 в виде зависимости градиента скорости сдвига (а) и эффективной вязкости (б) от напряжения сдвига

стотностью, при этом показатель фрактальности D снижается с 2.7 до 2.45.

4. Выводы

Полученные результаты исследований расширяют представления о механизме реологического поведения строительных смесей, демонстрируют формирование и разрушение фрактально-кластерных образований в микроструктуре ГДС. Показано, что в качестве количественной характеристики процессов структурообразования ГДС на микроуровне, а также для дополнительной оценки их структурно-реологических свойств может выступать показатель фрактальной размерности D , который можно определять с применением математического моделирования в специализированном программном обеспечении. Установлена взаимосвязь показателей фрактальности D с такими экспериментальными реологическими характеристиками как предельное напряжение сдвига τ_0 и эффективная вязкость η . Эти параметры варьируют в зависимости от свойств частиц твердой фазы компонентов ГДС, являющихся основой типичных строительных смесей. Полученные результаты могут являться основой для регулирования реологических свойств строительных смесей и оптимизации технологических процессов перемешивания, транспортирования и формования.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы

1. Баженов Ю. М. Технология бетона. М.: АСВ, 2007. 528 с.
2. Касторных Л. И., Рауткин А. В., Раев А. С. Влияние водоудерживающих добавок на некоторые свойства самоуплотняющихся бетонов. Часть 1. Реологические характеристики цементных композиций. *Строительные материалы*. 2017;750(7): 34–38. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-750-7-34-38>
3. Касторных Л. И., Деточенко И. А., Аринина Е. С. Влияние водоудерживающих добавок на некоторые свойства самоуплотняющихся бетонов. Часть 2. Реологические характеристики бетонных смесей и прочность самоуплотняющихся бетонов. *Строительные материалы*. 2017;11: 22–27. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30744336>
4. Калабина Д. А., Яковлев Г. И., Дрохитка Р., Грахов В. П., Первушин Г. Н., Баженов К. А., Трошкова В. В. Реологическая активация фторангидридных композиций эфирами поликарбоксилата. *Строительные материалы*. 2020;778(1–2): 38–47. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-38-47>
5. Kabagire K. D., Diederich P., Yahia A., Chekired M. Experimental assessment of the effect of particle characteristics on rheological properties of model mortar. *Construction and Building Materials*. 2017;151: 615–624. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.122>
6. Kim J. S., Kwon S. H., Jang K. P., Choi M. S. Concrete pumping prediction considering different measurement of the rheological properties. *Construction and Building Materials*. 2018;171: 493–503. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.194>
7. Weng Y., Lu B., Li M., Liu Z., Tan M. J., Qian S. Empirical models to predict rheological properties of fiber reinforced cementitious composites for 3D printing. *Construction and Building Materials*. 2018;189: 676–685. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.039>
8. Li D., Wang D., Ren C., Rui Y. Investigation of rheological properties of fresh cement paste containing ultrafine circulating fluidized bed fly ash. *Construction and Building Materials*. 2018;188: 1007–1013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.186>
9. Pan G., Li P., Chen L., Li G. A study of the effect of rheological properties of fresh concrete on shotcrete-rebound based on different additive components. *Construction and Building Materials*. 2019;224: 1069–1080. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.060>
10. Zhang S., Qiao W.-G., Chen P.-C., Xi K. Rheological and mechanical properties of microfine-cement-based grouts mixed with microfine fly ash, colloidal nanosilica and superplasticizer. *Construction and Building Materials*. 2019;212: 10–18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.314>
11. Hedayatinia F., Delnavaz M., Emamzadeh S. S. Rheological properties, compressive strength and life cycle assessment of self-compacting concrete containing natural pumice pozzolan. *Construction and Building Materials*. 2019;206: 122–129. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.059>
12. Kabagire K. D., Yahia A., Chekired M. Toward the prediction of rheological properties of self-consolidating concrete as diphasic material. *Construction and Building Materials*. 2019;195: 600–612. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.053>
13. Sonebi M., Abdalqader A., Fayyad T., Perrot A., Bai Y. Optimisation of rheological parameters, induced bleeding, permeability and mechanical properties of supersulfated cement grouts. *Construction and Building Materials*. 2020;262: 120078. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120078>

14. Roussel N. Rheological requirements for printable concretes. *Cement and Concrete Research*. 2018;112: 76–85. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.04.005>
15. Feys D., Asghari A. Influence of maximum applied shear rate on the measured rheological properties of flowable cement pastes. *Cement and Concrete Research*. 2019;117: 69–81. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.12.003>
16. Li Z., Cao G. Rheological behaviors and model of fresh concrete in vibrated state. *Cement and Concrete Research*. 2019;120: 217–226. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.03.020>
17. Choi B. I., Kim J. H., Shin, T. Y. Rheological model selection and a general model for evaluating the viscosity and microstructure of a highly-concentrated cement suspension. *Cement and Concrete Research*. 2019;123: 105775. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.020>
18. Khayat K. H., Meng W., Vallurupalli K., Teng L. Rheological properties of ultra-high-performance concrete – An overview. *Cement and Concrete Research*. 2019;124: 105828. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105828>
19. Ley-Hernández A. M., Feys D., Kumar A. How do different testing procedures affect the rheological properties of cement paste? *Cement and Concrete Research*. 2020;137: 106189. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106189>
20. Wyss H. M., Tervoort E. V., Gauckler L. J. Mechanics and microstructures of concentrated particulate gels. *Journal of the American Ceramic Society*. 2005;88(9): 2337–2348. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2005.00622.x>
21. Перцев В. Т., Леденев А. А., Усачев С. М., Усачев А. М. Оценка реологических свойств строительных смесей с получением дополнительных количественных характеристик. Конденсированные среды и межфазные границы. 2016;18(3): 394–401. Режим доступа: <https://journals.vsu.ru/kcmf/article/view/148>
22. Алексеева Е. В., Бобрышев А. Н., Воронов П. В., Головинский П. А., Лахно А. В., Перцев В. Т. Структурно-реологические свойства дисперсно-зернистых систем: монография. Воронеж: ВГАСУ; 2010. 196 с.
23. Малкин А. Я., Исаев А. И. Реология: концепции, методы, приложения. СПб.: Профессия; 2007. 560 с.
24. Шукин Е. Д., Перцов А. В., Амелина Е. А. Коллоидная химия. М.: Высшая школа; 2007. 444 с.
25. Бибик Е. Е. Реология дисперсных систем. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981, 172 с.
26. Перцев В. Т., Леденев А. А. Методологические подходы к исследованию реологических свойств строительных смесей. «Научный вестник Воронежского ГАСУ». Серия: физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. 2017;1(14): 71–77.
27. Mills P., Snabre P. The fractal concept in the rheology of concentrated suspensions. *Progress and Trends in Rheology II*. 1988: 105–108. DOI: [doi: 10.1007/978-3-642-49337-9_26](https://doi.org/10.1007/978-3-642-49337-9_26)
28. Леденев А. А., Усачев С. М., Перцев В. Т. Структурно-реологические свойства строительных смесей. Строительные материалы. 2009;7: 68–70. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12830653>
29. Перцев В. Т., Леденев А. А. Разработка эффективных комплексных органоминеральных добавок для регулирования реологических свойств бетонных смесей: монография. Воронеж: Воронежский ГАСУ; 2012. 136 с.
30. Перцев В. Т., Леденев А. А., Рудаков О. Б. Физико-химические подходы к разработке эффективных органоминеральных добавок для бетона. Конденсированные среды и межфазные границы. 2018;20(3): 432–442. DOI: <https://doi.org/10.17308/kcmf.2018.20/580>

Информация об авторах

Леденев Андрей Александрович, к. т. н., с. н. с., Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж), Воронеж, Российская Федерация; e-mail: ledenoff@mail.ru. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2493-8952>.

Перцев Виктор Тихонович, д. т. н., профессор, профессор кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: peres_v@mail.ru. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8882-4930>.

Рудаков Олег Борисович, д. х. н., профессор, заведующий кафедрой химии и химической технологии материалов, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: robi57@mail.ru. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2527-2857>.

Барабаш Дмитрий Евгеньевич, д. т. н., профессор, начальник кафедры изыскания и проектирования аэродромов, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж), Воронеж, Российская Федерация; e-mail: barabash60170@yandex.ru. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9438-8082>.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.