

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ



УДК 532.135: 666.97

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДООБРАЗНЫХ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ПРОИЗВОДСТВЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ, С ПОМОЩЬЮ КОНУСНОЙ ПЕНЕТРАЦИИ. ЧАСТЬ 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

*В.В. Белов**Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Белов В.В., 2024

Аннотация. В статье представлено описание того, как с помощью пенетрационного вискозиметра и специально разработанной методики были измерены предельное напряжение сдвига и вязкость в уплотненных твердообразных трехфазных дисперсных системах: увлажненного молотом песке различной дисперсности, смеси молотого и Вольского песка естественной дисперсности и цементно-песчаных смесях. Отмечено, что полученные зависимости реологических характеристик от влажности, удельной поверхности и пористости показывают непосредственную связь реологических свойств трехфазных дисперсных систем с капиллярным сцеплением. Это позволяет эффективно воздействовать на величину капиллярного сцепления и связанные с ним реологические свойства дисперсных систем, применяемых для производства строительных материалов.

Ключевые слова: структурированные дисперсные системы, предельное напряжение сдвига и вязкость, метод конусной пенетрации, конусный реометр.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-4-68-74

В частях 1 и 2 настоящей работы [1; 2] на основе изучения картины течения твердообразной дисперсной среды вокруг погруженного в нее конуса было показано, что для определения реологических характеристик таких систем целесообразно использовать метод конусной пенетрации.

Сырьевые смеси, применяемые в производстве многих строительных материалов, представляют собой структурированные дисперсные системы, которые относятся к классу упруговязкопластичных материалов. Знание реологических характеристик сырьевых смесей необходимо для практики, так как оптимальные показатели данных характеристик требуются для успешной работы технологического и транспортирующего оборудования, восприятия температурных напряжений в процессе тепловой обработки и т.п. При этом как технологические, так и эксплуатационные параметры определяются состоянием структуры изучаемого материала [3].

Использование рассмотренной в работах [1; 2] методики расчета пластично-вязких характеристик делает из пластометра конусный реометр, с помощью которого, а также

указанной выше методики можно определять реологические характеристики малопластичных дисперсных систем, применяемых в производстве строительных материалов (мелкозернистых жестких бетонных и растворных смесей, а также свежесформованных изделий (сырца), полученных методами полусухого прессования, вибропрессования); в производстве силикатного и керамического кирпича; прессованных и вибропрессованных бетонных изделий; сырца ячеистобетонных изделий и т.п. Эти трехфазные по агрегатному состоянию («твердое» – «жидкость» – «газ») системы с реологической точки зрения также являются твердообразными, в которых периоды восстановления разрушенных связей сокращаются.

В работе [4] установлен экстремальный характер зависимостей когезии цементных паст и бетонных смесей, определенной методом прямого сдвига, от водоцементного отношения (В/Ц). Как оказалось, максимум когезии для бетонных смесей ниже, чем для цементных паст, зависит от формы зерен заполнителя в случае непрерывной гранулометрии и не зависит от нее в случае прерывистой. Максимальные значения для когезии наблюдались при критических значениях В/Ц, когда цементная паста во время вибрации изменяет характер своего поведения, т.е. переходит от уплотнения, подобного сыпучим массам, к уплотнению с тиксотропным разрушением (разжижением) структуры [5]. Для таких высококонцентрированных трехфазных дисперсных систем, как влажные пресс-порошки, с ростом структурной прочности периоды восстановления разрушенных связей сокращаются. Поэтому тиксотропия в данных системах участвует в процессе течения скрыто, реализуясь лишь при поддержании состояния разрушения внутренних связей [6].

Ранее нами было показано [7], что прочность на разрыв трехфазных дисперсных систем определяется силами капиллярного сцепления, составляющими более 98 % от суммарной величины всех сил межчастичного взаимодействия. Максимальное капиллярное сцепление для данной системы (разрывная прочность) зависит от степени ее уплотнения, увеличиваясь с ростом последней, но достигается при одной и той же влажности. Аналогичный характер зависимости капиллярного сцепления от влажности (водотвердого отношения) в дисперсных системах и одной из реологических характеристик (когезии при сдвиге) таких дисперсных систем, как бетонные и растворные смеси, позволяет высказать обоснованное предположение о непосредственной связи реологических свойств трехфазных систем с капиллярным сцеплением. Цель настоящей работы заключалась в установлении указанной взаимосвязи и обосновании возможности направленного регулирования реологических свойств сырьевых смесей для производства строительных материалов.

Пробы исследуемых сред готовили в цилиндрической форме с внутренним диаметром 90 мм и высотой 40 мм. Пробы песка и сырьевых смесей уплотнялись на гидравлическом прессе в указанной форме со съемной насадкой до одного и того же объема, равного объему основной формы. Навеска песка или смеси рассчитывалась из условия получения заданной пористости или средней плотности в пересчете на сухое вещество. В некоторых экспериментах уплотнение проб производилось при заданном давлении прессования. В этих случаях навеска подбиралась из того расчета, чтобы при минимальном давлении прессования поверхность уплотненной пробы была примерно (чуть ниже) на одном уровне с краями формы. Содержание воды затворения изменялось от нуля до величины, соответствующей полному заполнению пор системы, т.е. достижению системой двухфазного состояния. Для количественной характеристики влажностного

состояния использовалась как величина влажности (водотвердого отношения), так и общепринятая при оценке указанного состояния растворных смесей величина водо-вяжущего (для цементно-песчаных смесей – В/Ц) отношения.

При повышении влажности предельное напряжение сдвига и вязкость уплотненного до постоянной пористости молотого песка с удельными поверхностями 103, 196, 298 и 384 м²/кг сначала растут, достигают максимума при определенной влажности, а затем уменьшаются (рис. 1, 2). Такой же характер носит и изменение капиллярного сцепления в этой системе в зависимости от влажности [7], причем, как оказалось, значения влажности W_{MC} , соответствующие максимумам разрывной прочности (капиллярного сцепления) и предельного напряжения сдвига для молотого песка с одинаковой удельной поверхностью, совпадают (независимо от пористости системы). Следовательно, предельное напряжение сдвига трехфазных дисперсных систем определяется в основном капиллярным сцеплением и отражает его действие. Зависимости вязкости уплотненного молотого песка от влажности имеют аналогичный характер. Вместе с тем, поскольку величина пластической вязкости зависит не только от сил сцепления, но и от коэффициента внутреннего трения, который с увеличением влажности системы монотонно уменьшается, максимум вязкости дисперсных систем наблюдается при влажности, меньшей влажности W_{MC} .

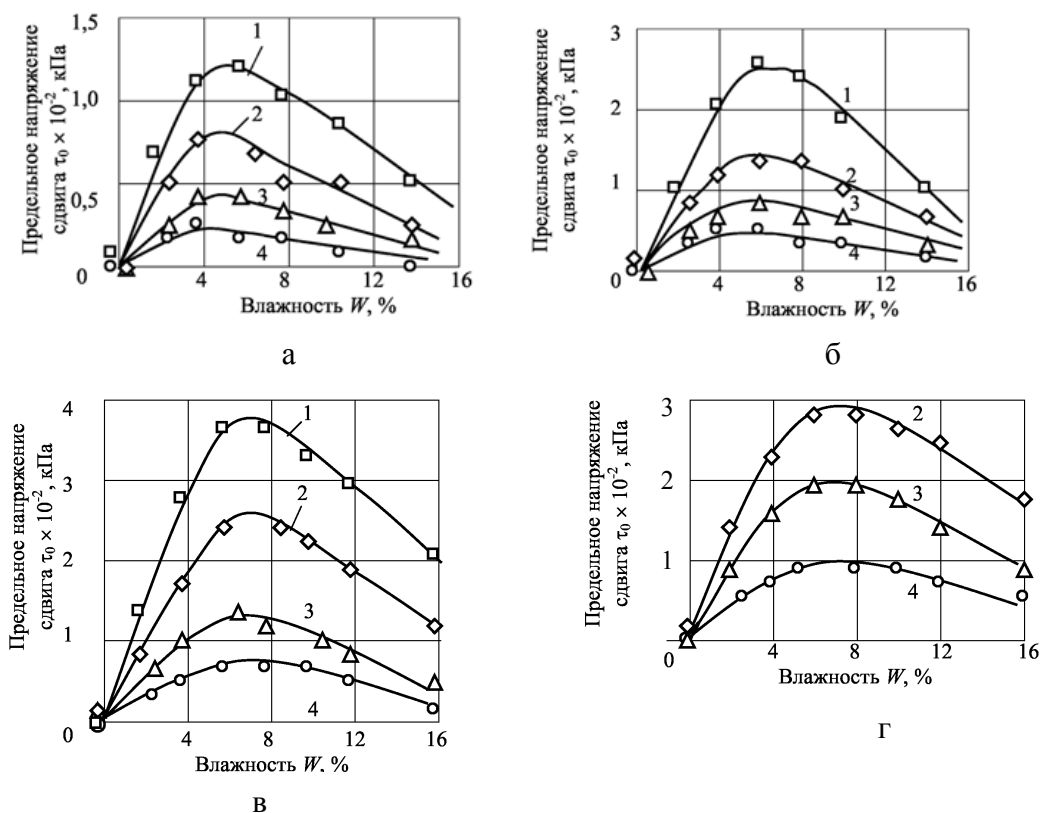


Рис. 1. Предельное напряжение сдвига уплотненного молотого песка с удельной поверхностью, м²/кг: а – 103; б – 196; в – 298; г – 384 в зависимости от влажности; 1 – пористость образцов 42 %; 2 – 46 %; 3 – 50 %; 4 – 54 %

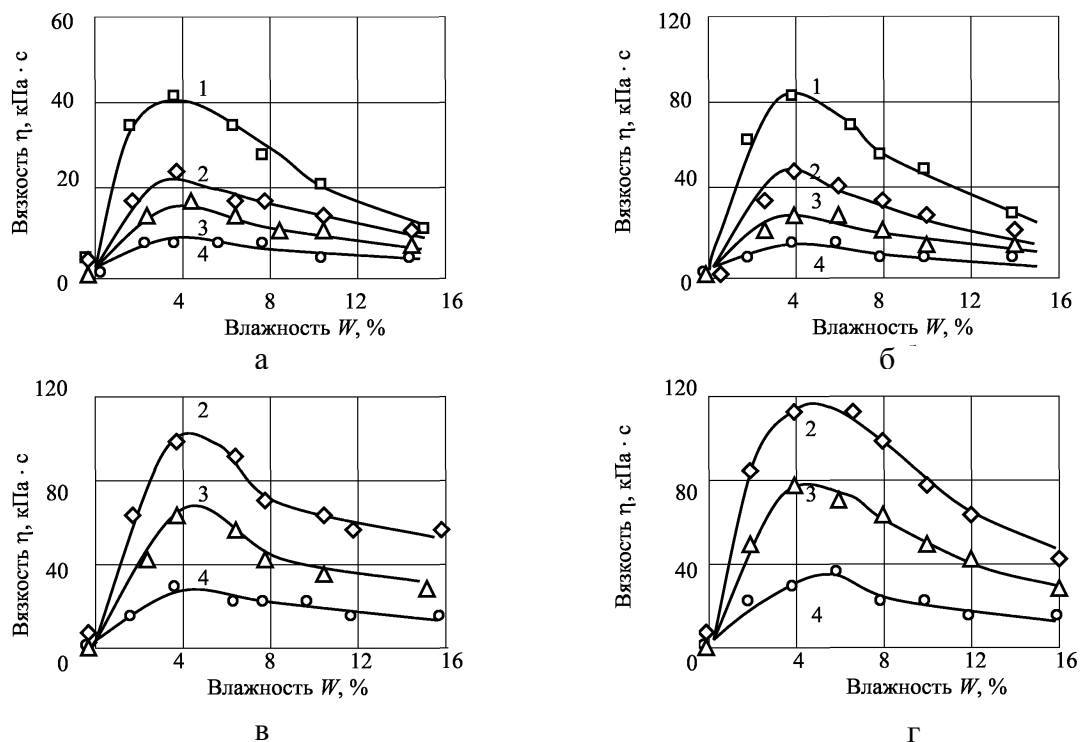


Рис. 2. Вязкость уплотненного молотого песка с удельной поверхностью, $\text{м}^2/\text{кг}$: а – 103; б – 196; в – 298; г – 384 в зависимости от влажности; 1 – пористость образцов 42 %; 2 – 46 %; 3 – 50 %; 4 – 54 %

На графиках зависимостей вязкости от влажности (см. рис. 2) хорошо заметно скачкообразное падение значений этого параметра при превышении влажности $W_{\text{мс}}$. Таким образом, можно ожидать, что именно влажность $W_{\text{мс}}$ для данных систем будет характеризовать отмеченный ранее [6] переход их состояния от влажных пресс-порошков к концентрированным пастам, и этот переход реализуется с потерей свойства зернистых сред, а именно сыпучести, и приобретением основного свойства, определяющего реологию, – связности. При этом, как указано в работе [6], высококонцентрированные дисперсии обладают высокой чувствительностью к балансу добавочной жидкости, при которой форсируется переход системы в другой структурно-механический тип. Данный переход и характеризуется скачкообразным падением вязкости при превышении влажности $W_{\text{мс}}$.

Трансформацию фрагмента ячеистой структуры трехфазной дисперсной системы при сдвиговой деформации можно представить на модели (рис. 3).

При сдвиговой деформации в трехфазной структурированной дисперсной системе под действием сил капиллярного сцепления происходят скачкообразный разрыв связи между частицами и такое же восстановление связи, но уже с соседней частицей. Таким образом, частицы системы как бы передают эстафету связей друг другу. Этот эстафетный характер разрушения и восстановления структуры определяет малый период данных процессов и слабо выраженные тиксотропные свойства систем.

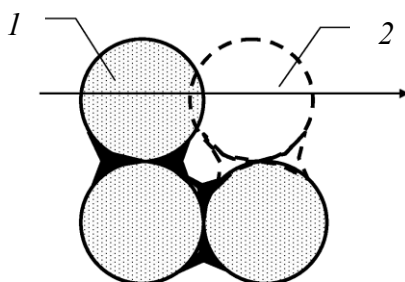


Рис. 3. Трансформация фрагмента ячеистой структуры трехфазной дисперсной системы при сдвиговой деформации: 1 – положение частицы до деформации; 2 – после деформации

Увеличение количества жидкости в зонах контакта частиц изменяет реологическое поведение системы. При этом формируется переходный тип системы, характеризующийся наличием трехфазных агрегатов-гранул, в которых воздух находится в защемленном состоянии, а связность гранул определяется внешними капиллярными силами. Модель трансформации фрагмента структуры такой системы при сдвиговой деформации (рис. 4) показывает, что в системе процесс деформирования происходит плавно, сглаживается и демпфируется окружающей жидкостью, причем разрушение и восстановление структуры будут носить менее выраженный характер на фоне сохраняющейся связности гранул. Поэтому данная система, представляющая собой в уплотненном состоянии концентрированную пасту, будет обладать ярко выраженными тиксотропными свойствами.

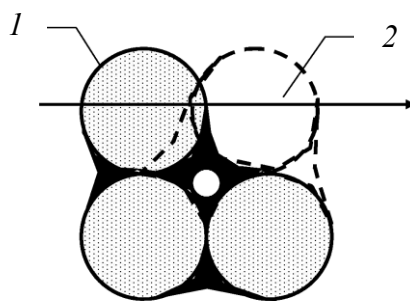


Рис. 4. Трансформация фрагмента структуры трехфазной гранулы при сдвиговой деформации: 1 – положение частицы до деформации; 2 – после деформации

Таким образом, предельное напряжение сдвига и вязкость твердообразных дисперсных систем, применяемых в производстве строительных материалов, могут определяться на пенетрационном реометре ПРБ-2 с использованием методики, которая разработана в настоящем исследовании на основе экспериментально полученной картины деформирования среды вокруг конуса.

Пенетрационный реометр ПРБ-2 и теория определения реологических характеристик, основанная на учете истинного характера деформирования среды вокруг конуса, являются базой для развития пенетрационной вискозиметрии твердообразных дисперсных

систем. Дальнейшее применение прибора ПРБ-2 и разработанной теории может выявить новые особенности как метода, так и реологических свойств различных материалов.

Предельное напряжение сдвига трехфазных дисперсных систем устанавливается в основном капиллярным сцеплением и отражает его действие. Величина пластической вязкости зависит не только от сил сцепления, но и от коэффициента внутреннего трения между частицами дисперсной системы. Влажность W_{mc} , соответствующая максимуму капиллярного сцепления и предельного напряжения сдвига в системе, характеризует переход ее состояния от влажного пресс-порошка к концентрированной пасте. Этот переход отличается скачкообразным падением вязкости. Указанная связь капиллярного сцепления и реологического поведения системы объясняется эстафетным характером разрушения и восстановления ее структуры в трехфазном состоянии (при наличии внутренних капиллярных сил) и последующим переходом этой структуры в другой структурно-механический тип, характеризующийся преимущественным действием внешних капиллярных сил в трехфазных гранулах, что определяет появление резко выраженных тиксотропных свойств системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов В.В. Определение реологических свойств твердообразных дисперсных систем, применяемых в производстве строительных материалов, с помощью конусной пенетрации. Часть 1. Теоретическое обоснование метода // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2024. № 2 (22). С. 72–82.
2. Белов В.В. Определение реологических свойств твердообразных дисперсных систем, применяемых в производстве строительных материалов, с помощью конусной пенетрации. Часть 2. Приборное обеспечение // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2024. № 3 (23). С. 70–78.
3. Структурно-топологические особенности кинетических процессов / А.Н. Бобрышев [и др.] // *Вестник отделения строительных наук РААСН*. 2000. Вып. 3. С. 109–114.
4. Иванов Я.П. Реологические свойства бетонной смеси и цементных паст. Технологическая механика бетона. Рига: РПИ, 1976. С. 33–44.
5. Иванов Я. О реологии цементных паст, растворов и бетонных смесей. *Механика сплошных сред: Сборник материалов*. София: БАН, 1968. С. 343–349.
6. Калашников В.И., Иванов И.А. Особенности реологических изменений цементных композиций под действием ионостабилизирующих пластификаторов // *Технологическая механика бетона: Сборник научных трудов*. Рига: РПИ, 1984. С. 103–118.
7. Берней И.И., Белов В.В. Силы капиллярного сцепления и их влияние на технологию и свойства строительных материалов // *Производство и применение асбестоцемента: Межвузовский тематический сборник*. Калинин: Калинин. ун-т, 1979. С. 3–44.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

БЕЛОВ Владимир Владимирович – советник РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Белов В.В. Определение реологических свойств твердообразных дисперсных систем, применяемых в производстве строительных материалов, с помощью конусной пенетрации. Часть 3. Экспериментальные исследования // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2024. № 4 (24). С. 68–74.

**DETERMINATION OF RHEOLOGICAL PROPERTIES
OF SOLID DISPERSED SYSTEMS USED IN THE PRODUCTION
OF BUILDING MATERIALS APPLYING CONE PENETRATION TECHNIQUE.
PART 3. PILOT STUDIES**

V.V. Belov

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The article describes how, using a penetration viscometer and a specially developed technique, the limiting shear stress and viscosity were measured in compacted solid three-phase dispersed systems: hammer-moistened sand of various dispersities, mixtures of ground and Volsky sand of natural dispersion and cement-sand mixtures. It is noted that the obtained dependences of rheological characteristics on humidity, specific surface area and porosity show a direct relationship between the rheological properties of three-phase dispersed systems with capillary coupling. This makes it possible to effectively influence the amount of capillary adhesion and the associated rheological properties of dispersed systems used for the production of building materials.

Keywords: structured dispersed systems, ultimate shear stress and viscosity, cone penetration method, cone rheometer.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

BELOV Vladimir Vladimirovich – Adviser of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Building Materials and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Belov V.V. Determination of rheological properties of solid dispersed systems used in the production of building materials applying cone penetration technique. Part 3. Pilot studies // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 4 (24), pp. 68–74.