

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-18-27

**Сивальнева М.Н.**

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

E-mail: 549041@mail.ru

## РЕОЛОГИЯ ВЯЖУЩИХ СИСТЕМ РАЗЛИЧНОГО ТИПА ТВЕРДЕНИЯ ПРИ ДИСПЕРСНОМ АРМИРОВАНИИ

**Аннотация.** Рассмотрено влияние дисперсно-армирующих добавок на реологию модельных систем вяжущих веществ различного типа твердения, а именно портландцемента и бесцементной высококонцентрированной вяжущей суспензии (ВВС) на основе кварцевого песка. Применялись базальтовая, стеклянная, целлюлозно-полимерная и поливинилспиртовая фибры. Получение и транспортирование пенобетонных смесей для обеспечения стабильности свойств целесообразно проводить в регулируемом структурном состоянии, поэтому реологические исследования являются эффективным инструментом оптимизации и контроля технологических процессов. Основные реологические зависимости определены на ротационном вискозиметре. Установлено, что применение фибры различных видов не изменяет тип течения смесей. Отличительные черты реологии различных вяжущих систем обусловлены особенностями структурообразования. Значения начальной вязкости цементных смесей связаны со сроками твердения и протеканием гидратационных процессов. Введение дисперсно-армирующих добавок в бесцементное вяжущее способствует образованию зернисто-волоконистых агрегатов, что и объясняет повышение первоначальной вязкости.

Определено, что использование фибры с более короткими волокнами способствует повышению подвижности смесей. Определены прочностные характеристики вяжущих, которые увеличиваются с введением фибры. Полученные результаты изучения реологических характеристик микроармированных вяжущих систем являются базой для регулирования подвижности фибропенобетонных смесей.

**Ключевые слова:** реология, бесцементное вяжущее, высококонцентрированная вяжущая суспензия, фибра, пенобетон.

**Введение.** Постоянно растущие требования к теплоизоляции зданий и сооружений определяют необходимость в современных строительных композитах соответствующей области назначения. На рынке теплоизоляционных и конструкционно-теплоизоляционных материалов лидирующие позиции занимают ячеистые бетоны. Основная особенность материалов данного вида – закрытая пористая структура, которая как раз и определяет теплотехнические показатели композита. Актуальность их использования и, в частности пенобетона, обоснована широким распространением и увеличивающейся областью применения за счет высокой экономической эффективности, вызванной сочетанием повышенной комфортности и минимальных строительных затрат. Несмотря на перспективность и ряд положительных сторон, пенобетон требует улучшения физико-механических свойств, которые связаны с его высокой пористостью и развитой системой связанных пор. В результате чего пенобетон не применяется для изготовления основных несущих элементов конструкций зданий, исключение может составлять индивидуальное и малоэтажное строительство [1].

Решением может являться применение дисперсного армирования [2–5], которое позволяет повысить прочностные характеристики, преимущественно

прочность на растяжение, трещиностойкость, ударную вязкость, усадку [6, 7], а также интенсифицировать процессы структурообразования и твердения бетона.

Как правило, в литературных источниках под дисперсно-армированными композитами понимают моноармированные материалы на классическом, т.е. цементном вяжущем, создающие произвольно направленную каркасную структуру упрочненных связей, влияние которых направлено на повышение физико-механических характеристик. В данном случае, основным показателем контроля выступает прочность на растяжение при изгибе, которая может увеличиваться более чем в 2 раза. Отмечается также повышение прочности на сжатие, но в значительно меньшей степени. При этом интенсивность роста физико-механических свойств зависит от вида фиброволокна, конкретного состава ячеистобетонной смеси с определенным значением водотвердого отношения [8], технологических режимов производства.

На рынке представлено большое количество видов фибр, отличающихся химическим составом, физико-механическими характеристиками, размерами и морфоструктурными особенностями поверхности волокон. Армирование бетонов выполняется металлическими, минеральными, органическими волокнами фибр [1, 9].

Наиболее востребованными в технологии дисперсно-армированных бетонов являются базальтовая, полипропиленовая, полиамидная, стеклянная фибры. Меньшее распространение получили хризотилитовое, целлюлозно-полимерное, целлюлозное, углеродное, поливиниловое, капроновое и другие волокна.

В литературе зарубежных авторов часто встречаются упоминания об использовании в качестве армирующих компонентов натуральных волокон. Армирование данными волокнами позволяет получать материалы с высокими механическими свойствами, низкой плотностью и стоимостью. Кроме того, данные волокна являются биоразлагаемыми, возобновляемыми и экологичными [10, 11]. Их примером являются древесные и льняные волокна, волокна сизаля, кокосовой пальмы, джута, бамбука, крафт-целлюлозы и др., использование которых обеспечивает повышение прочности на изгиб, удар, растяжение, сжатие и вязкости разрушения [12, 13].

Однако применение натуральных волокон в строительных материалах на цементной основе ограничено в виду низкой стойкости к щелочной среде цементной матрицы, что приводит к деградации волокон, снижению гибкости и деформирующей способности из-за повышенной хрупкости, связанной с минерализацией волокон, что в совокупности вызывает снижение прочности и долговечности композита [14]. Способами борьбы с данным негативным фактором является предварительное нанесение полимерных покрытий, химическая и термическая обработка волокон [15].

Также возможно применение комплексного дисперсного армирования (полиармирования), заключающегося в сочетании волокон не только различных видов, но и геометрических параметров (преимущественно разной длины), обеспечивающих оптимальную комбинацию низко- и высокомодульных армирующих волокон, что позволяет достичь уменьшения усадочных деформаций при одновременном росте прочности на изгиб [8, 16, 17]. Данное направление дисперсного армирования нашло отражение во многих работах зарубежных авторов, сочетающих натуральные волокна с другими типами фибр. Так комплексное влияние различных синтетических и натуральных волокон сводится к росту физико-механических свойств пенобетона на цементном вяжущем, а именно незначительно увеличивает его прочность на сжатие, одновременно повышая прочность на растяжение до 3 раз, прочность на изгиб до 4 раз и ударную вязкость до 6 раз [8]. Также отмечается повышение прочности, функциональных характеристик и долговечности пенобетона за счет введения

фибры из поливинилового спирта и кокосового волокна [18].

Следует отметить, что дисперсно-армирующие компоненты оказывают влияние не только на качественные характеристики готового изделия, но и на растворные смеси, которые отличаются повышенной стабильностью, агрегативной и седиментационной устойчивостью [19, 20]. Применение фибры в процессе приготовления пенобетонной смеси воздействует на реологические свойства в ранний период твердения. Фибра является фактором, влияющим на процессы массопереноса, управляя качеством и периодом фазового перехода от вязкого состояния к твердому, несколько снижая среднюю плотность при условии ограничения трещиностойкости [6].

**Материалы и методы.** Основными сырьевыми компонентами при выполнении исследования являлись:

1) портландцемент марки ЦЕМ I 42,5 Н (ЗАО «Белгородский цемент»), химического состава: CaO – 66,43 %, SiO<sub>2</sub> – 22,05 %, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 5,11 %, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 4,38 %, MgO – 0,48 %, SO<sub>3</sub> – 0,23 %, прочее – 1,32 % и минералогического состава: 3CaO·SiO<sub>2</sub> – 61,9 %, 2CaO·SiO<sub>2</sub>·β – 17,2 %, 3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 6,8 %, 4CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 13,5 %, прочее – 0,6 %;

2) бесцементная высококонцентрированная вяжущая суспензия силикатного состава, получаемая при постадийном помоле кварцевого песка (Корочанского месторождения Белгородской области) по мокрому способу в шаровой мельнице. Наличие нанодисперсной составляющей (менее 0,1 мкм) в количестве 10–14 % обуславливает принадлежность к наноструктурированным вяжущим (НВ). Твердение ВВС осуществляется по негидратационному типу, а именно поликонденсационно-кристаллизационному механизму, заключающемуся в протекании на первом этапе процесса поликонденсации с участием водной составляющей в сшивке силоксановых связей и автоэпитаксиальной кристаллизацией аморфной составляющей на кристаллических частицах α-кварца на втором этапе. При этом исходный кремнезем является кварцем первой генерации, а новообразованный в процессе твердения – кварцем второй генерации [21]. Характеристики ВВС в естественном суспендированном состоянии: остаток на сите № 0063 – 0,7 %, вязкость – 12–14 Па·с, pH – 7,7, влажность 17 % и характеристики камня: предел прочности при сжатии – 3,4 МПа, предел прочности при изгибе – 1,5 МПа, средняя плотность – 1800–2000 кг/м<sup>3</sup>;

3) дисперсно-армирующие добавки для пенобетона представлены базальтовой фиброй (ООО «Каменный век», Россия, Московская область, г. Дубна), стекловолокном (ООО «Альянс

– Строительные технологии», Россия, Московская область, г. Дзержинский), целлюлозно-полимерной фиброй Buskeye UltraFiber 500 (компания «Buskeye Technologies Inc», США), фиброй на основе поливинилового спирта (ПВС-фиброй)

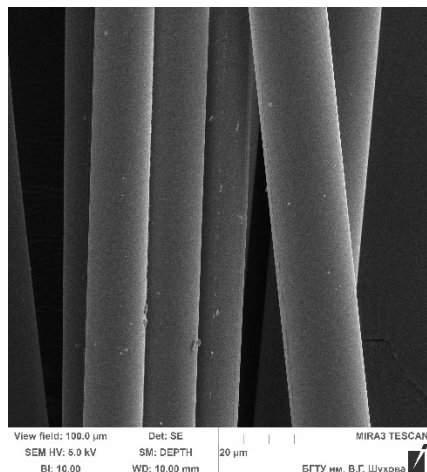
(«Курарай», Япония, г. Осака). Данные по размерным параметрам волокон предоставлены производителями (таблица 1).

Поверхность волокон была изучена с помощью сканирующего электронного микроскопа Mira 3 FesSem (рис. 1).

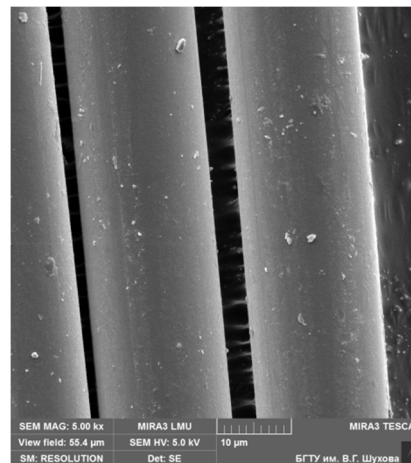
Таблица 1

**Основные характеристики применяемой фибры**

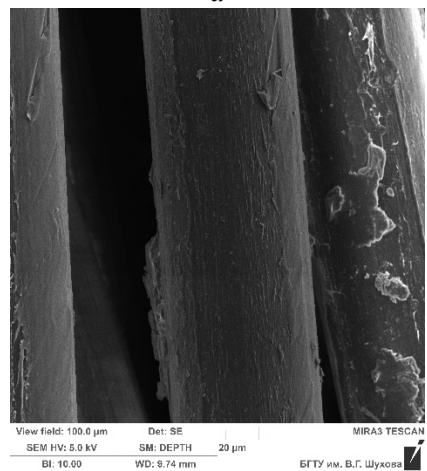
Фибра	Базальтовая	Стеклоанная	Целлюлозно-полимерная	ПВС-фибра
Длина волокна, мм	12,7	12	2,1	12
Диаметр волокна, мкм	10–22	6–21	18	38



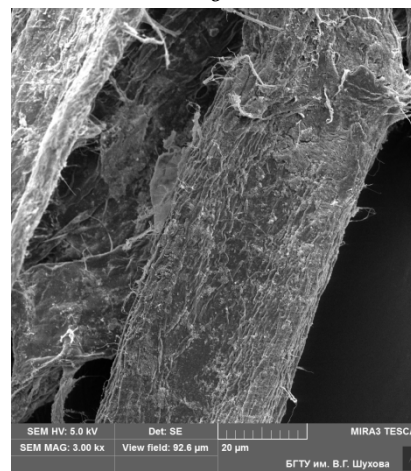
а



б



в



г

Рис. 1. Микроструктура поверхности волокон следующих фибр:  
а – базальтовой; б – стеклянной; в – ПВС; г – целлюлозно-полимерной

Для изучения реологических характеристик были приготовлены смеси модельных систем на основе вяжущих различного типа твердения (портландцемента и ВВС), моно- и полиармированных разными волокнами. Следует отметить, что обычно пенобетон выступает многокомпонентной системой. В данном случае, с целью переноса полученных результатов изучалось влияние армирующих компонентов только на вяжущее, на основе которого будут получены ячеистые композиты. Поэтому исследуемые системы

именуются модельными. Водоцементное отношение (В/Ц) цементных смесей – 0,45. Дозировка фиброволокон составила 0,2 % от массы вяжущего, которая ориентирована на ранее выполненные исследования [22]. Полиармирование осуществлялось в соотношении 1:1. Съемка производилась на ротационном вискозиметре Rheotest RN4.1 при использовании измерительной системы «цилиндр–цилиндр». Суть измерений заключается в том, что свежеприготовленная смесь, помещенная в измерительный стакан, подвергается сдвиговым воздействиям в зазоре от

вращающейся внутренней насадки (шпинделя) и неподвижного цилиндра. Съемка осуществлялась при скорости вращения  $120 \text{ мин}^{-1}$  в течение 2 минут. Исследована реология вяжущих систем с той позиции, что результаты влияния фибры являются более наглядными и проецируются на пенобетонные смеси, полученные на основе двух различных вяжущих систем – портландцементе и бесцементной ВВС.

Прочностные характеристики армированных вяжущих определялись в соответствии с методикой ГОСТ 30744–2001.

**Основная часть.** Как известно, фибробетоны характеризуются сложной морфологией и полиструктурностью, обусловленными их гетерогенностью. Использование дисперсно-армирующих добавок способствует повышению структурной стойкости на различных этапах формирования, улучшению основных физико-механических (прочностных и деформативных) и теплофизических характеристик [2–4, 23]. При этом влияние оказывает не только состав, но и геометрические параметры волокон.

Полиармирование, т.е. одновременное армирование несколькими видами волокон, позволяет комплексно регулировать структурообразующие процессы и итоговые характеристики композита в широких пределах, исключая недостатки моноармирования. Особенность комбинированного армирования заключается в формировании пространственных ячеек на разных уровнях структуры композита, границы которых определяются параметрами армирования. При данном условии ограничивается формирование и распространение микродефектов на стадии трещинообразования. К тому же фиброволокна, с учетом высокой адгезии, эффективно работают в контактной зоне и приводят к снижению концентрации напряжений, воздействуя на весь композит в целом. Происходит рост прочностных характеристик [16, 17, 24].

При разработке фибробетонов следует руководствоваться рациональным выбором армирующих добавок, на который, в свою очередь, оказывают влияние следующие факторы: размер, вид и назначение готового изделия, предел прочности на растяжение при изгибе, предел прочности при сжатии, вязкость разрушения, удобоукладываемость смеси, в определенных случаях – морозостойкость, водонепроницаемость, истираемость и другие свойства.

Важным является представление о дисперсной арматуре как о части своеобразного заполнителя, который обладает развитой боковой поверхностью и оказывает серьезное влияние на реологические и технологические характери-

стики [17]. В свою очередь, получение и транспортирование бетонных смесей различного состава целесообразно проводить в структурном режиме, что обеспечивает стабильность свойств. Именно поэтому реологические исследования могут являться важным и эффективным инструментом оптимизации и контроля технологии материалов.

В работе были получены реограммы, которые указывают, что применение фибры не изменяет тиксотропный тип течения контрольных составов различных вяжущих систем, характеризующийся плавным снижением вязкости при одновременном росте градиента скорости сдвига до  $25 \text{ с}^{-1}$  (рис. 2 и 3).

Цементные системы показывают поведение реологически сложного тела с достаточно небольшим напряжением сдвига и эффективной вязкостью, значение которой последовательно снижается (рис. 2). Максимальный эффект наблюдается у образцов с комбинированным армированием целлюлозно-полимерной и ПВС-фибрами, при этом на начальном участке вязкость уменьшается на 80 % относительно исходной системы, на конечном – на 90 %. Исключение составляет цементная суспензия с базальтовой фиброй, начальная вязкость которой увеличивается на 14 % и при градиенте скорости сдвига  $18 \text{ с}^{-1}$  приближается к значениям контрольного состава. Течение систем с практически постоянной наименьшей вязкостью указывает на полное разрушение структуры суспензии. Преимущественно криволинейные зависимости напряжения сдвига от градиента скорости указывают на проявление псевдопластических свойств.

ВВС проявляют вязкопластичное поведение. Анализ кривых армированного бесцементного вяжущего показал, что большая часть образцов характеризуются повышением вязкости в пределах 29 % (рис. 3). Прямолинейные участки реологических кривых указывают на структурный режим, сопровождающийся вязким течением суспензии (рис. 3, б). Максимальные значения аналогично с цементными образцами достигаются у смеси с базальтовой фиброй. Понижением вязкости при нарастающей сдвиговой нагрузки характеризуются смеси с целлюлозно-полимерной фиброй и полиармированные поливинилспиртовыми и целлюлозно-полимерными волокнами. Таким образом, прослеживается зависимость реологических характеристик от геометрических параметров дисперсно-армирующих компонентов. Использование фибры с более короткими волокнами способствует повышению подвижности смесей, что указывает на целесообразность полиармирования волокнами разной длины.

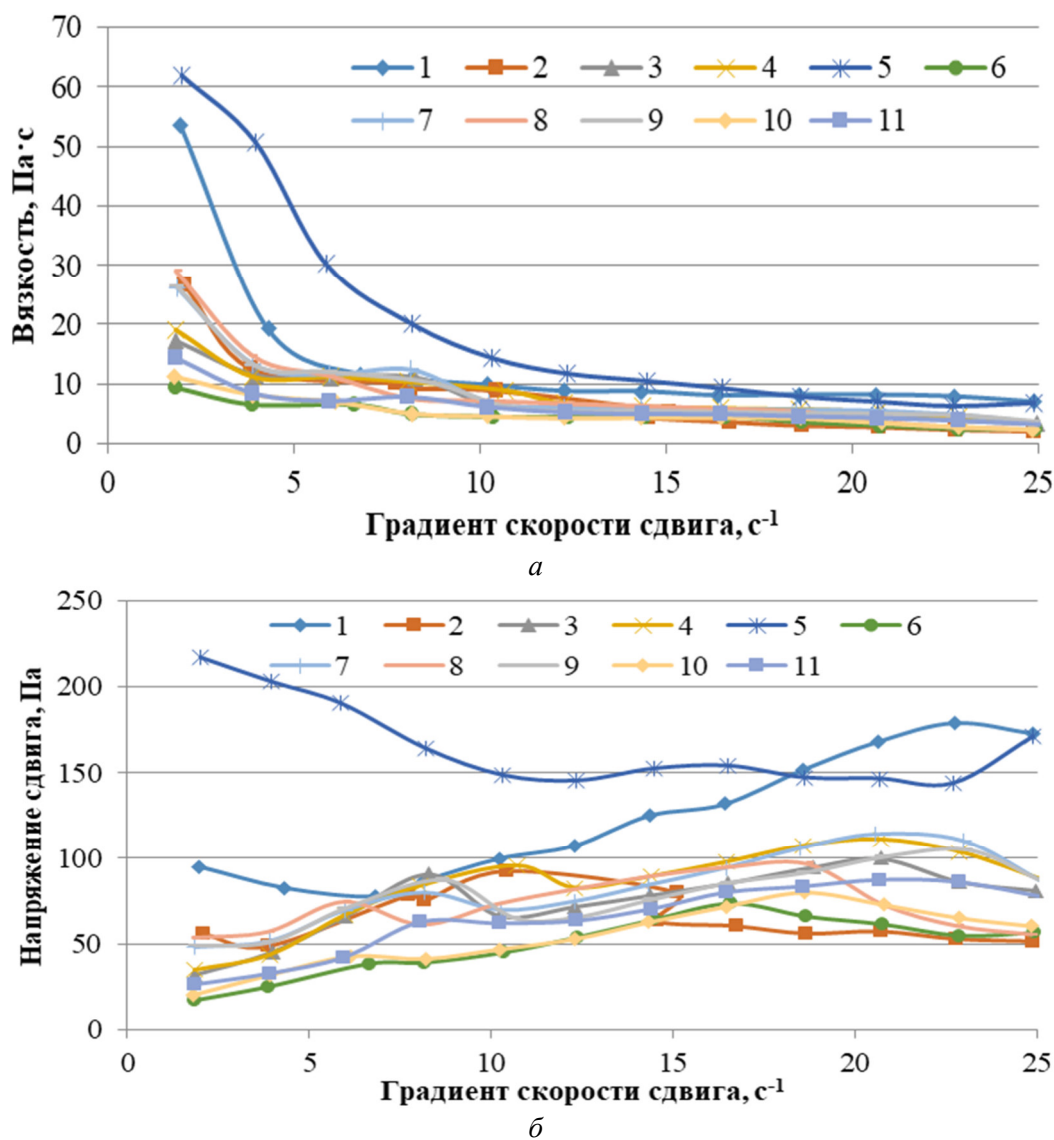


Рис. 2. Реограмма цементного теста, армированного различными фиброволокнами:

*а* – зависимость вязкости от градиента скорости сдвига;

*б* – зависимость напряжения сдвига от градиента скорости сдвига;

- 1 – контрольный состав, 2 – с целлюлозно-полимерной, 3 – с ПВС-фиброй, 4 – со стеклянной, 5 – с базальтовой, 6 – с целлюлозно-полимерной и ПВС-фиброй, 7 – со стеклянной и ПВС-фиброй, 8 – с базальтовой и ПВС-фиброй, 9 – со стеклянной и целлюлозно-полимерной, 10 – с базальтовой и целлюлозно-полимерной, 11 – с базальтовой и стеклянной

Можно предположить, что отличительные черты реологии вяжущих систем на основе цемента и ВВС обусловлены особенностями структурообразования. Повышенные значения начальной вязкости цементных смесей связаны со сроками твердения и протеканием структурообразующих процессов на начальном этапе за счет распределения твердой фазы в объеме дисперсионной среды и развития первичной гидратации портландцемента. Системы бесцементного вяжущего проявляют меньшую активность при формировании структурных элементов. Введение дисперсно-армирующих добавок способствует образованию зернисто-волоконистых агрегатов, что и объясняет повышение первоначальной вязкости. Следует отметить, что данное обстоятельство

может являться инструментом при повышении пластической прочности получаемых изделий и материалов.

Изучение основных физико-механических характеристик указывает на целесообразность применения дисперсно-армирующих добавок. Моноармирование бесцементных модельных систем повышает предел прочности при сжатии на 18–24 %, полиармирование – до 30 % (рис. 4). Данный результат находит объяснение в совместном действии использованных волокон, создавая многоуровневую структуру и сочетая преимущества каждой фибры. По сравнению с бездобавочным образцом ВВС, средняя плотность в зависимости от состава незначительно снижается.

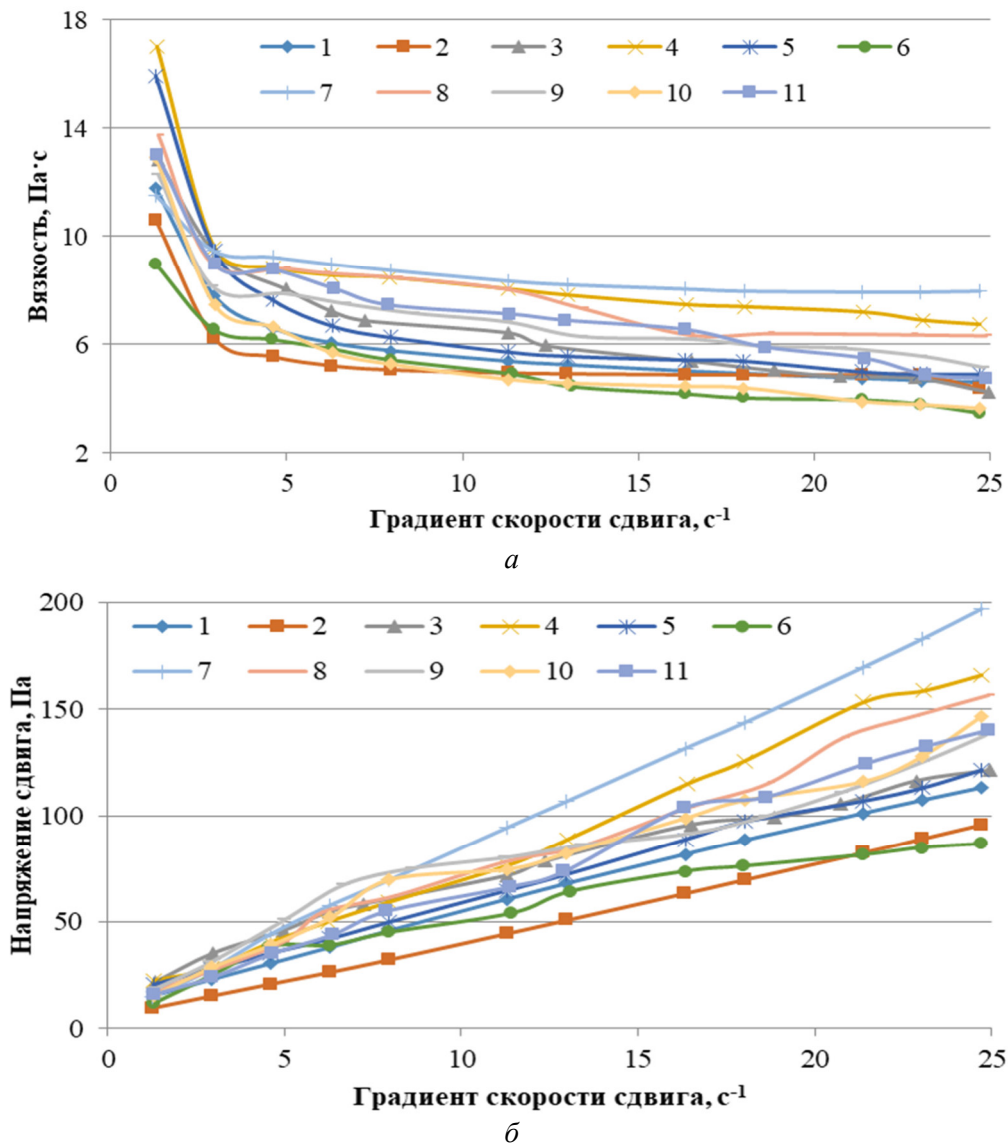


Рис. 3. Реограмма ВВС, армированной различными фиброволокнами:

*а* – зависимость вязкости от градиента скорости сдвига;

*б* – зависимость напряжения сдвига от градиента скорости сдвига;

1 – контрольный состав, 2 – с целлюлозно-полимерной, 3 – с ПВС-фиброй, 4 – со стеклянной, 5 – с базальтовой, 6 – с целлюлозно-полимерной и ПВС-фиброй, 7 – со стеклянной и ПВС-фиброй, 8 – с базальтовой и ПВС-фиброй, 9 – со стеклянной и целлюлозно-полимерной, 10 – с базальтовой и целлюлозно-полимерной, 11 – с базальтовой и стеклянной

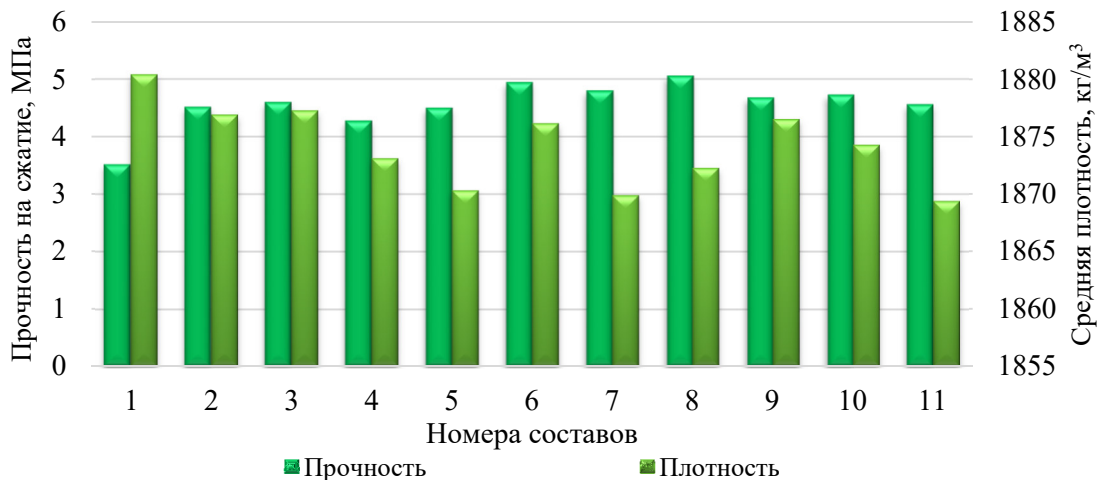


Рис. 4. Влияние фибры на основные физико-механические характеристики бесцементной системы ВВС (расшифровка составов указана на рис. 3)

**Выводы**

1. Установлено, что применение волокон фибры различных видов не изменяет тип течения растворных смесей на основе портландцемента и бесцементной высококонцентрированной вяжущей суспензии силикатного состава. Преимущественно низкие концентрации дисперсно-армирующей добавки в системах увеличивают подвижность.

2. Определена зависимость реологических характеристик от геометрических параметров волокон. Использование фибры с более короткими волокнами способствует снижению вязкости смесей, что указывает на целесообразность полиармирования волокнами разной длины.

3. Результаты изучения реологических характеристик армированных вяжущих систем различного типа твердения являются базой для регулирования подвижности фибропенбетонных смесей, получаемых на их основе.

4. Дисперсное армирование бесцементных модельных систем повышает прочностные характеристики, максимальный эффект достигается при комбинированном армировании (до 30 %).

*Источник финансирования. Работа выполнена в рамках реализации государственного задания Минобрнауки РФ № FZWN-2023-0006 с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.*

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Gencel O., Nodehi M., Bayraktar O.Y., Kaplan G., Benli A., Gholampourf A., Ozbakkaloglu T. Basalt fiber-reinforced foam concrete containing silica fume: An experimental study // *Construction and Building Materials*. 2022. № 326. Article 126861. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126861.

2. Моргун В.Н. О динамике улучшения технологических и эксплуатационных свойств пенобетонов при их дисперсном армировании пропиленовыми волокнами // *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2023. Т. 2. № 4. С. 69–76. DOI: 10.23947/2949-1835-2023-2-4-69-76.

3. Голова Т.А., Магеррамова И.А., Андреева Н.В. Технология производства неавтоклавных пенобетонов, дисперсно армированных модифицированными волокнами // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета*. Серия: Строительство и архитектура. 2020. № 1 (78). С. 126–135.

4. Баранова А.А., Боброва А.А. Дисперсное армирование ячеистого и мелкозернистого бетонов на основе микрокремнезема // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*.

2019. № 9(4). С. 694–703. DOI: 10.21285/2227-2917-2019-4-694-703.

5. Попов А.Л., Строкова В.В. Фибропенбетон автоклавного твердения с использованием композиционного вяжущего // *Строительные материалы*. 2019. № 5. С. 38–44. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-770-5-38-44.

6. Моргун В.Н. Научное обоснование структурной модификации свойств пенобетонов // *Строительные материалы*. 2023. № 7. С. 29–35. DOI: 10.31659/0585-430X-2023-815-7-29-35.

7. Рудкова А.С., Весова Л.М. Использование дисперсного армирования в малоэтажном строительстве из ячеистого бетона // *Инженерный вестник Дона*. 2019. № 2 (53). С. 43.

8. Строчкин В.Н., Крохин А.М., Савин В.И., Зимин С.Г. Дисперсное армирование ячеистого бетона как фактор улучшения его физико-механических свойств // *Вестник НИЦ Строительство*. 2020. № 1 (24). С. 132–147. DOI: 10.37538/2224-9494-2020-1(24)-132-147.

9. Khan M., Shakeel M., Khan K., Akbar S., Khan A. A Review on Fiber-Reinforced Foam Concrete // *Engineering Proceedings*. 2022. Vol. 22. № 1. Article 13. DOI: 10.3390/engproc2022022013.

10. Hoyos C.G., Zuluaga R., Gañán P., Pique T.M., Vazquez A. Cellulose nanofibrils extracted from fique fibers as bio-based cement additive // *Journal of Cleaner Production*. 2019. № 235. Pp. 1540–1548. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.06.292.

11. Frydrych M., Hýsek Š., Fridrichová L., Le Van S., Herclík M., Pechočciaková M., Le Chi H., Louda P. Impact of Flax and Basalt Fibre Reinforcement on Selected Properties of Geopolymer Composites // *Sustainability*. 2020. № 12. Article 118. DOI: 10.3390/su12010118.

12. Ahmad W., Farooq S.H., Usman M., Khan M., Ahmad A., Aslam F., Yousef R.A., Abduljabbar H.A., Sufian M. Effect of Coconut Fiber Length and Content on Properties of High Strength Concrete // *Materials*. 2020. № 13. Article 1075. DOI: 10.3390/ma13051075.

13. Okeola A.A., Abuodha S.O., Mwero J. Experimental Investigation of the Physical and Mechanical Properties of Sisal Fiber-Reinforced Concrete // *Fibers*. 2018. № 6. Article 53. DOI: 10.3390/fib6030053.

14. Tolêdo Filho R.D., Scrivener K., England G.L., Ghavami K. Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites // *Cement and Concrete Composites*. 2000. № 22. Pp. 127–143. DOI: 10.1016/S0958-9465(99)00039-6.

15. Castillo-Lara J.F., Flores-Johnson E.A., Valadez-Gonzalez A., Herrera-Franco P.J., Carrillo J.G., Gonzalez-Chi P.I., Li Q.M. Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Foamed Concrete //



Materials. 2020. № 13. Article 3060. DOI: 10.3390/ma13143060.

16. Klyuev S.V., Klyuev A.V., Khezhev T.A., Pukhareno Y.V. High-strength fine-grained fiber concrete with combined reinforcement by fiber // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018. Vol. 13. № S8. Pp. 6407–6412. DOI: 10.3923/jeasci.2018.6407.6412.

17. Пухаренко Ю.В., Инчик В.В., Пантелеев Д.А., Жаворонков М.И. Проектирование составов полиармированных фибробетонов // Вестник гражданских инженеров. 2018. № 3 (68). С. 118–122. DOI: 10.23968/1999-5571-2018-15-3-118-122.

18. Raj B., Sathyan D., Madhavan M. K., Raj A. Mechanical and durability properties of hybrid fiber reinforced foam concrete // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 245. Article 118373. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118373.

19. Моргун Л.В., Вотрин Д.А. Управление скоростью фазового перехода в фибропенобетонных смесях с помощью длины армирующей фибры // Наука и бизнес: пути развития. 2018. № 5 (83). С. 47–52.

20. Аубакирова И.У., Пухаренко Ю.В. Формирование структуры фибропенобетона на макроуровне // Вестник гражданских инженеров. 2023. № 4 (99). С. 77–82. DOI: 10.23968/1999-5571-2023-20-4-77-82.

21. Строчкова В.В., Сивальнева М.Н., Жерновский И.В., Кобзев В.А., Нелюбова В.В. Особенности механизма твердения наноструктурированного вяжущего // Строительные материалы. 2016. № 1–2. С. 62–69.

22. Kharkhardin A.N., Sivalneva M.N., Strokov V.V. Topological calculation of key parameters of fibre for production of foam concrete based on cement-free nanostructured binder // Nanotechnologies in construction-a scientific internet-journal. 2016. Vol. 8. № 4. Pp. 73–88. DOI: 10.15828/2075-8545-2016-8-4-73-88.

23. Строчкин В.Н., Крохин А.М., Савин В.И., Зимин С.Г. Дисперсное армирование ячеистого бетона как фактор улучшения его физико-механических свойств // Вестник НИЦ Строительство. 2020. № 1 (24). С. 132–147. DOI: 10.37538/2224-9494-2020-1(24)-132-147.

24. Суворов И.О. Влияние дисперсного полиармирования на усадочные деформации фибропенобетона неавтоклавного твердения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. № 1. С. 32–35.

#### Информация об авторах

**Сивальнева Мариана Николаевна**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры материаловедения и технологии материалов. E-mail: 549041@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 17.07.2024 г.

© Сивальнева М.Н., 2024

**Sivalneva M.N.**

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

*E-mail: 549041@mail.ru*

## RHEOLOGICAL BEHAVIOR OF BINDING SYSTEMS OF DIFFERENT TYPES OF CURING DURING REINFORCEMENT

**Abstract.** *The influence of dispersed reinforcing additives on the rheology of model systems of binders of various types of hardening, specifically Portland cement and a cementless highly concentrated binding suspension (HCBS) based on quartz sand, is considered. Basalt, glass, cellulose-polymer and polyvinyl alcohol fibers were used. To ensure stable properties, it is advisable to produce and transport foam concrete mixtures in a controlled structural state, therefore rheological studies are an effective tool for optimizing and controlling technological processes. The main rheological dependencies were determined on a rotational viscometer. It has been established that the use of various types of fiber does not change the type of flow of the mixtures. The distinctive features of the rheology of various binder systems are due to the peculiarities of structure formation. The values of the initial viscosity of cement mixtures are related to the hardening time and the course of hydration processes. The introduction of dispersed reinforcing additives into cementless binder promotes the formation of granular-fibrous aggregates, which explains the increase in initial viscosity.*

*It has been determined that the use of shorter fibers improves the mobility of mixtures. The strength characteristics of binders have been determined, which increase with the introduction of fiber. The obtained*



results of studying the rheological characteristics of micro-reinforced binder systems are the basis for regulating the mobility of fiber foam concrete mixtures.

**Keywords:** rheology, cementless binder, highly concentrated binding suspension, fiber, foam concrete.

## REFERENCES

- Gencil O., Nodehi M., Bayraktar O.Y., Kaplan G., Benli A., Gholampourf A., Ozbakkaloglu T. Basalt fiber-reinforced foam concrete containing silica fume: An experimental study. *Construction and Building Materials*. 2022. No 326. Article 126861. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126861.
- Morgun V.N. About Dynamics of Improving the Foam Concrete Technological and Operational Properties upon Disperse Reinforcement with Polypropylene Fibers [O dinamike uluchsheniya texnologicheskix i e'kspluatacionny'x svoystv penobetonov pri ix dispersnom armirovanii polipropilenny'mi voloknami]. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2023. Vol. 2. No. 4. Pp. 69–76. DOI: 10.23947/2949-1835-2023-2-4-69-76. (rus)
- Golova T.A., Magerramova I.A., Andreeva N.V. Production technology of non-autoclaved foam concrete, dispersed reinforced with modified fibers [Tekhnologiya proizvodstva neavtoklavny'kh penobetonov, dispersno armirovanny'kh modificirovanny'mi voloknami]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturostroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture]*. 2020. No. 1. Pp. 126–135. (rus)
- Baranova AA., Bobrova AA. Dispersed reinforcement of cellular and fine-grained concrete based on silica fume [Dispersnoe armirovanie yacheistogo i melkozernistogo betonov na osnove mikrokremnezema]. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate [Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost']*. 2019. Vol. 9. No. 4. Pp. 694–703. DOI: 10.21285/2227-2917-2019-4-694-703. (rus)
- Popov A.L., Stokova V.V. Fiber foam concrete of autoclave hardening with the use of composite binder [Fibropenobeton avtoklavnogo tverdeniya s ispol'zovaniem kompozitsionnogo vyazhushhego]. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2019. No. 5. Pp. 38–44. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-770-5-38-44. (rus)
- Morgun V.N. Scientific justification for structural modification of foam concrete properties [Nauchnoe obosnovanie strukturnoj modifikacii svoystv penobetonov]. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2023. No. 7. Pp. 29–35. DOI: 10.31659/0585-430X-2023-815-7-29-35. (rus)
- Rudkova A.S., Vesova L.M. The use of dispersed reinforcement in low-rise construction of cellular concrete [Ispol'zovanie dispersnogo armirovaniya v maloe'tazhnom stroitel'stve iz yacheistogo betona]. *Engineering journal of Don*. 2019. Vol. 2. No. 53. P. 43. (rus)
- Strotskiy V.N., Krokhin A.M., Savin V.I., Zimin S.G. Dispersed reinforcement of cellular concrete as a factor of improvement of its physical and mechanical properties [Dispersnoe armirovanie yacheistogo betona kak faktor uluchsheniya ego fiziko-mekhanicheskix svoystv]. *Bulletin of the Scientific Research Center "Construction"*. 2020. No. 1 (24). Pp. 132-147. DOI:10.37538/2224-9494-2020-1(24)-132-147. (rus)
- Khan M., Shakeel M., Khan K., Akbar S., Khan A. A Review on Fiber-Reinforced Foam Concrete. *Engineering Proceedings*. 2022. Vol. 22. No. 1. Article 13. DOI: 10.3390/engproc 2022022013.
- Hoyos C.G., Zuluaga R., Gañán P., Pique T.M., Vazquez A. Cellulose nanofibrils extracted from fique fibers as bio-based cement additive. *Journal of Cleaner Production*. 2019. No. 235. Pp. 1540–1548. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.06.292.
- Frydrych M., Hýsek Š., Fridrichová L., Le Van S., Herclík M., Pecho'ciaková M., Le Chi H., Louda P. Impact of Flax and Basalt Fibre Reinforcement on Selected Properties of Geopolymer Composites. *Sustainability*. 2020. No. 12. Article 118. DOI: 10.3390/su12010118.
- Ahmad W., Farooq S.H., Usman M., Khan M., Ahmad A., Aslam F., Yousef R.A., Abduljabbar H.A., Sufian M. Effect of Coconut Fiber Length and Content on Properties of High Strength Concrete. *Materials*. 2020. No. 13. Article 1075. DOI: 10.3390/ma13051075.
- Okeola A.A., Abuodha S.O., Mwero J. Experimental Investigation of the Physical and Mechanical Properties of Sisal Fiber-Reinforced Concrete. *Fibers*. 2018. No. 6. Article 53. DOI: 10.3390/fib6030053.
- Tolêdo Filho R.D., Scrivener K., England G.L., Ghavami K. Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites. *Cement and Concrete Composites*. 2000. No. 22. Pp. 127–143. DOI: 10.1016/S0958-9465(99)00039-6.
- Castillo-Lara J.F., Flores-Johnson E.A., Valadez-Gonzalez A., Herrera-Franco P.J., Carrillo J.G., Gonzalez-Chi P.I., Li Q.M. Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Foamed Concrete. *Materials*. 2020. No. 13. Article 3060. DOI: 10.3390/ma13143060.
- Klyuev S.V., Klyuev A.V., Khezhev T.A., Pukhareno Y.V. High-strength fine-grained fiber concrete with combined reinforcement by fiber. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018. Vol. 13. No. S8. Pp. 6407–6412. DOI: 10.3923/jeasci.2018.6407.6412.

17. Pukharenko Yu.V., Inchik V.V., Pantelev D.A., Zhavoronkov M.I. Designing of poly-fiber-reinforced concrete compositions [Proektirovanie sostavov poliarmirovannykh fibrobetonov]. Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov [Bulletin of Civil Engineers]. 2018. Vol. 3. No. 68. Pp. 118–122. DOI: 10.23968/1999-5571-2018-15-3-118-122. (rus)

18. Raj B., Sathyan D., Madhavan M. K., Raj A. Mechanical and durability properties of hybrid fiber reinforced foam concrete. Construction and Building Materials. 2020. Vol. 245. Article 118373. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118373.

19. Morgun L.V., Varyrin D.A. Controlling the rate of phase transition in fibro-concrete mixtures using the length of reinforcing fiber [Upravlenie skorost'yu fazovogo perekhoda v fibropenobetonnykh smesyakh s pomoshch'yu dliny armiruyushchej fibry]. Science and business: development ways. 2018. Vol. 5. No. 83. Pp. 47–52. (rus)

20. Aubakirova I.U., Pukharenko Yu.V. Fiber foam concrete structure formation at the macrolevel [Formirovanie struktury fibropenobetona na makrourovne]. Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov [Bulletin of Civil Engineers]. 2023. Vol. 4. No. 99. Pp. 77–82. DOI: 10.23968/1999-5571-2023-20-4-77-82. (rus)

21. Strokova V.V., Sivalneva M.N., Zhernovskiy I.V., Kobzev V.A., Nelubova V.V. Features of hardening mechanism of nanostructured

binder [Osobennosti mekhanizma tverdeniya nanostrukturirovannogo vyazhushchego]. Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]. 2016. No. 1–2. Pp. 62–69. (rus)

22. Kharkhardin A.N., Sivalneva M.N., Strokova V.V. Topological calculation of key parameters of fibre for production of foam concrete based on cement-free nanostructured binder. Nanotechnologies in construction—a scientific internet-journal. 2016. Vol. 8. No 4. Pp. 73–88. DOI: 10.15828/2075-8545-2016-8-4-73-88.

23. Strotskiy V., Krokhin A., Savin V., Zimin S. Dispersed reinforcement of cellular concrete as a factor of improvement of its physical and mechanical properties [Dispersnoe armirovanie yacheistogo betona kak faktor uluchsheniya ego fiziko-mekhanicheskikh svoystv]. Bulletin of the Scientific Research Center “Construction”. 2020. Vol. 1. No. 24. Pp. 132–147. DOI: 10.37538/2224-9494-2020-1(24)-132-147. (rus)

24. Suvorov I.O. Influence of disperse polyreinforcement on shrinkage deformations of non-autoclave curing fibrofoam concrete [Vliyanie dispersnogo poliarmirovaniya na usadochnyye deformaczii fibropenobetona neavtoklavnogo tverdeniya]. Bulletin of Belgorod state technological University named after V.G. Shukhov. 2015. No. 1. Pp. 32–35. (rus)

#### *Information about the authors*

**Sivalneva, Mariana N.** PhD. E-mail: 549041@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

*Received 17.07.2024*

#### **Для цитирования:**

Сивальнева М.Н. Реология вяжущих систем различного типа твердения при дисперсном армировании // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 12. С. 18–27. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-18-27

#### **For citation:**

Sivalneva M.N. Rheological behavior of binding systems of different types of curing during reinforcement. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 12. Pp. 18–27. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-18-27