

ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТЬЮ ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ И ИХ РЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Ш.М. Рахимбаев, Н.М. Толыпина, Е.Н. Хахалева

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова», Белгород, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Теоретической основой регулирования подвижности и удобоукладываемости бетонных смесей и других реологически сложных тел является реология. В технической литературе по реологическим свойствам бетонных смесей широко используются названия добавок: пластификатор, суперпластификатор, гиперпластификатор. Названия предложены фирмами-изготовителями этих добавок в рекламных целях. В статье авторами дано уточнение физического смысла терминов пластификатор, суперпластификатор, разжижитель цементных систем.

Материалы и методы. Для характеристики реотехнологических свойств суспензий и паст в строительной индустрии широко используют величину расплыва конуса, которая не всегда обеспечивает адекватность их подвижности. Установлено, что взаимосвязь между пластической вязкостью и расплывом конуса зависит от степени разжижения их модифицирующими добавками. Авторами рассмотрены экспериментальные данные цементных суспензий без добавки и с умеренной дозировкой добавок, которые являются реологическими сложными упруго-вязко-пластическими телами.

Результаты. Показано, что величина расплыва конуса, особенно в области умеренных дозировок добавок, адекватно отражает реологические свойства цементных систем. При больших и малых величинах пластической вязкости расплыв конуса слабо отражает реологические свойства дисперсных систем.

Обсуждение и выводы. Даны рекомендации по рациональному применению расплыва конуса для характеристики реотехнологических свойств цементных систем.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цементные системы, бетонные смеси, пластификатор, расплыва конуса, предел текучести, пластическая вязкость, реологические свойства.

Благодарности: Статья подготовлена в рамках Программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.

ВВЕДЕНИЕ

В современной технической литературе по реологическим свойствам бетонных смесей широко используются следующие названия добавок: пластификатор, суперпластификатор, гиперпластификатор. Считаем необходимым подчеркнуть, что эти термины некорректны. Они предложены фирмами-изготовителями добавок в рекламных целях. Следует отметить, что модификаторы С-3, MF, СБ и т.д. уменьшают предел текучести цементных систем почти до 0 [1, 2]. Таким образом, практически эти добавки ликвидируют пластические свойства цементных систем, т.е. являются депластификаторами. Пластификаторы, очевидно, должны усиливать предел текучести, но

на практике такого не наблюдается. В связи с этим авторы данной работы в дальнейшем при описании добавок-модификаторов С-3, MF и т.д. используют термин «разжижитель», т.е. увеличивающий подвижность цементных систем, что соответствует физической сущности действия данных добавок.

Вопросами реологии бетонных смесей занимались многие российские и зарубежные специалисты [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14]. Реологические исследования позволяют получать важную информацию о текучести суспензий и паст. Для изучения реологических свойств дисперсных систем применяют ротационные и капиллярные вискозиметры и другие типы реометров [3]. К их недостаткам мож-

но отнести то, что ротационный вискозиметр не позволяет изучать бетонные смеси, содержащие крупный и мелкий заполнитель, поэтому в технической литературе мало реограмм таких систем. В связи с этим возникает вопрос о корректности применяемых на практике реотехнологических способов оценки текучести цементных систем. Свойства бетонных смесей определяют путем измерения расплыва конуса [15, 16, 17]. Однако существует ли взаимосвязь между вязкостью и расплывом конуса? Ниже авторы излагают результаты исследований по данному вопросу.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Теоретической основой регулирования подвижности бетонных смесей, их удобоукладываемости, способности подвергаться перекачиванию является реология – раздел физики, изучающий течение жидкостей, многофазных суспензий и паст.

Простейшими представителями текучих тел являются газы и маловязкие жидкости, например, вода, керосин, этиловый спирт. Они начинают течь при сколько угодно малом напряжении сдвига. Их течение описывается известным законом Ньютона [2, 6]:

$$P = \eta \cdot \dot{\epsilon}, \text{ или } P = \eta \cdot (du / dn), \quad (1)$$

где P – напряжение сдвига, Па;

$\dot{\epsilon} = (du / dn)$ – градиент скорости сдвига, с^{-1} ;

η – коэффициент динамической вязкости, $\text{Па} \cdot \text{с}$.

Если на графике (рисунок 1) по оси абсцисс отложить градиент скорости сдвига $\dot{\epsilon}$, а по оси ординат – напряжение сдвига P , то получится прямая линия, угол наклона которой будет характеризовать коэффициент динамической вязкости $\eta = k \operatorname{tg} \alpha$. При этом прямая пересекает начало координат [2].



Рисунок 1 – График вязкого течения ньютоновской жидкости

Fig. 1 – Diagram of the viscous Newtonian fluid flow

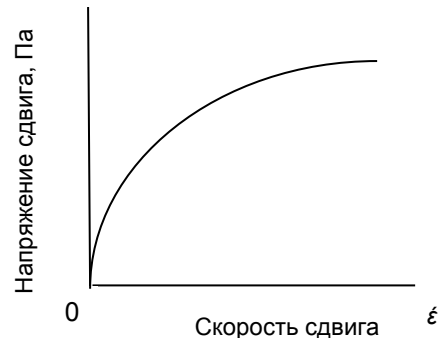


Рисунок 2 – Кривая течения псевдопластической жидкости
Fig. 2 – Curve of the pseudoplastic fluid flow

Течение некоторых жидкостей не подчиняется закону Ньютона, так как их вязкость меняется с ростом градиента скорости сдвига. К их числу относятся псевдопластические жидкости, кривая течения, которые изображены на рисунке 2. Их вязкое течение может быть описано уравнением, предложенным Оствальдом [2]:

$$P = k \cdot \dot{\epsilon}^n, \quad (2)$$

где P – напряжение сдвига, Па;

k – показатель консистенции;

n – показатель псевдопластичности, $n < 1$.

При $n = 1$ формула Оствальда превращается в закон Ньютона. Показатель консистенции в противоположность коэффициенту динамической вязкости не является константой, а его численное значение и размерность зависят от скорости сдвига и степени нелинейности n .

Многие тела при деформации и течении проявляют не только вязкие, но и упругие свойства, т.е. способность обратимо изменять свою форму при приложении нагрузки, возвращаясь в исходное состояние при ее снятии. Такие тела можно назвать вязко-упругими [2].

Вязко-пластичные тела при движении проявляют наряду с вязкими пластические свойства, т.е. способность при напряжении, превышающем предел текучести, деформироваться необратимо. При снятии нагрузки их деформации сохраняются. Примером таких тел является пластилин, глиняная паста и др. [2, 8, 13].

Для описания течения вязко-пластичных тел Бингам предложил уравнение, названное его именем:

$$P = P_c + \eta_{пл} \cdot \dot{\epsilon}, \quad (3)$$

где P_c – предел текучести, или предельное статическое напряжение сдвига, Па;

$\dot{\epsilon}$ – градиент скорости сдвига, с^{-1} ;

$\eta_{пл}$ – пластическая вязкость, $\text{Па} \cdot \text{с}$.

Если действующее на тело напряжение сдвига ниже определенного предела, т.е. $P < P_c$, то вязкое течение не наблюдается, тело либо вообще не деформируется, либо испытывает обратимую упругую деформацию. Реальные дисперсные системы часто обладают свойствами упругости, вязкости, пластичности и псевдопластичности. Так, глинистые, цементные, известковые суспензии при достаточно высоком содержании твердой фазы в процессе деформирования ведут себя как реологически сложные среды. Их течение может быть описано уравнением Балкли-Гершеля [2, 18]:

$$P = P_c + \eta_{пл} \cdot \dot{\epsilon}^n. \quad (4)$$

Реограмма реологически сложного нелинейного вязкопластичного тела показана на рисунке 3.

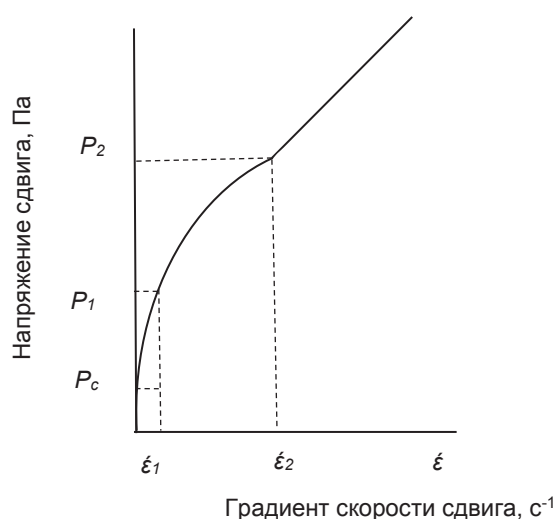


Рисунок 3 – Реограмма нелинейного вязкопластичного тела

Figure 3 – Rheogram of a nonlinear viscoplastic body

Здесь при $P < P_c$ тело проявляет лишь обратимую упругую деформацию. До $P < P_1$ наблюдается вязкое течение суспензии с практически неразрушенной структурой, т.е. структурный режим с максимальной пластической вязкостью η_{max} . Отрезок реограммы на участке $P_c - P_1$ почти прямолинеен. При дальнейшем увеличении напряжения сдвига от P_1 до P_2 суспен-

зия проявляет псевдопластические свойства, и реограмма имеет криволинейную форму. В этом интервале напряжений и градиентов скорости сдвига происходит падение пластической вязкости дисперсной системы. Это обычно обусловлено разрушением коагуляционной структуры дисперсии, распадом ее на более мелкие первичные частицы, что сопровождается высвобождением так называемой иммобилизированной воды, заключенной в пустотах структурной ячейки, и падением вязкости [2, 19].

При $P = P_2$ разрушение структуры суспензии завершается и далее течение происходит с постоянной наименьшей вязкостью практически полностью разрушенной структуры η_{min} . На этом участке реограмма прямолинейна [2].

Важным свойством структурированных дисперсных систем является изменение во времени их свойств, особенно при увеличении или уменьшении скорости сдвига.

Тела, вязкость которых возрастает во времени при постоянной скорости деформации, называются реопектическими. У дилатантных систем вязкость возрастает при увеличении скорости сдвига [20]. В противоположность этим телам у тиксотропных дисперсных систем при увеличении скорости сдвига вязкость снижается. На этом основано разжижение бетонных смесей при виброобработке [1, 2].

Добавки ПАВ снижают предел текучести и вязкость, но уменьшение вязкости при этом меньше. Применение этих добавок помогает готовить литые строительные смеси, когда наблюдается почти нулевой предел текучести, при этом отпадает необходимость их вибрировать.

На рисунке 4 приведены зависимости предельного динамического напряжения сдвига и пластической вязкости цементных суспензий от концентрации добавок, полученных в работе [10]. Из рисунка следует, что цементные суспензии без пластифицирующих добавок представляют собой реологически сложное тело с небольшим предельным напряжением сдвига и пластической вязкостью, которая снижается по мере роста скорости сдвига и увеличении дозировки модификатора.

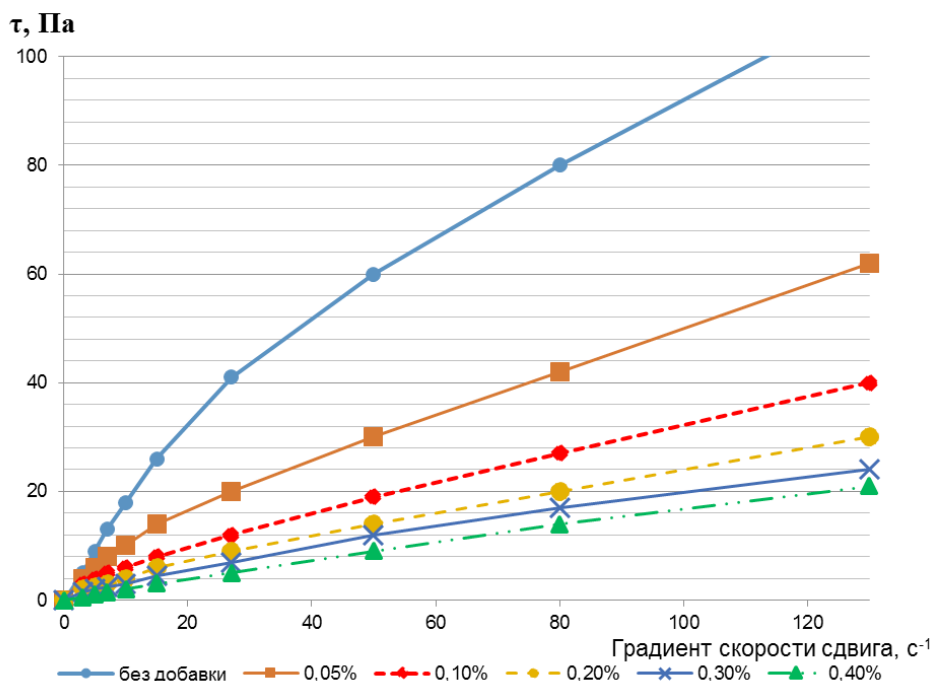


Рисунок 4 – Реологические кривые цементных суспензий с модификатором СБ-ФФ
Figure 4 – Rheological curves of cement suspensions with the SB-FF modifier

При добавлении органического модификатора СБ-ФФ степень нелинейности реограммы снижается, и при вводе в систему суспензии 0,4 % пластификатора реограмма приобретает прямолинейный характер. Таким образом, ввод достаточного количества пластифицирующей добавки полностью снимает нелиней-

ность, и последняя течет в области градиента скорости сдвига до 150 с^{-1} с постоянной скоростью.

На рисунке 5 приведена зависимость пластической вязкости цементных суспензий от концентрации добавок, полученных в работе [10].

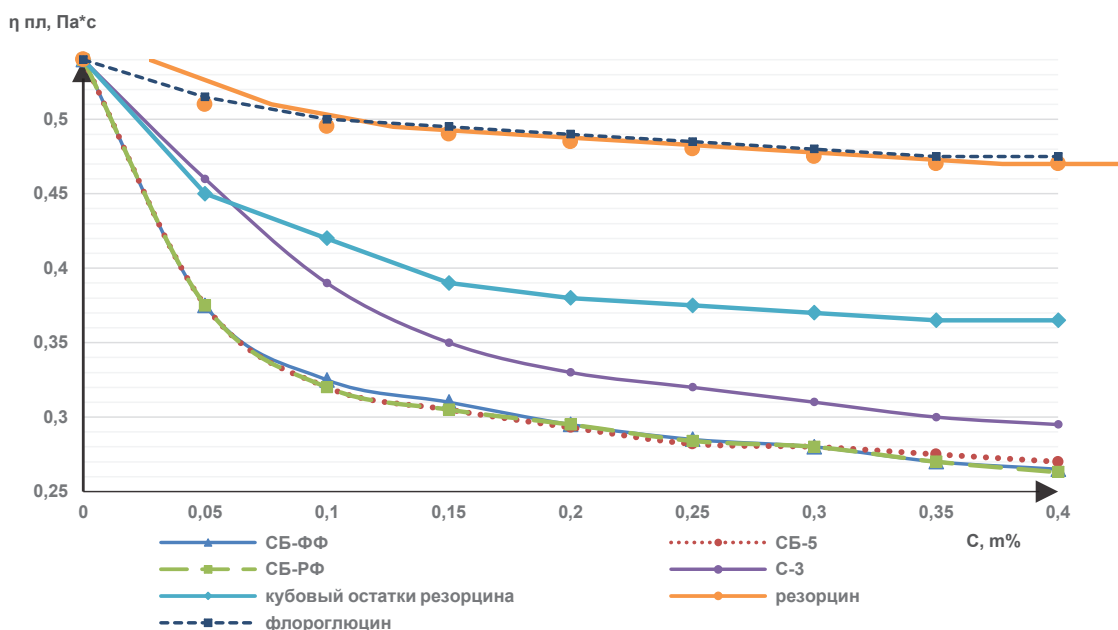


Рисунок 5 – Зависимость пластической вязкости цементных суспензий от концентраций добавок
Figure 5 – Dependence of the cement suspensions' plastic viscosity on the concentrations of additives

Установлено, что наибольшее влияние на величину предельного напряжения сдвига, особенно в области малых концентраций, оказывают модифицирующие добавки, разработанные в БГТУ олигомеры СБ-ФФ, СБ-РФ и СБ-5, затем следует суперпластификатор С-3, а мономеры резорцин, флороглюцин слабо влияют на реологические параметры суспензий. Аналогичная зависимость наблюдается при исследовании пластической вязкости цементных суспензий с вышеперечисленными добавками [10].

В исследованиях цементных суспензий того же состава, выполненных с использованием миниконуса [10], показано, что наиболее эффективно действуют добавки СБ-ФФ, СБ-РФ, СБ-5 на диаметр расплыва цементной пасты, особенно в области средних дозировок ПАВ. С-3 и кубовые остатки резорцина оказывают меньшее влияние на подвижность цементной пасты. При введении мономеров резорцина и флороглюцина заметного изменения подвижности цементной суспензии не происходит.

Установленная в работе [10] взаимосвязь реологических свойств с подвижностью должным образом не проанализирована.

Несмотря на большое практическое значение вопроса о том, насколько сопоставимы результаты измерения расплыва конуса с данны-

ми вискозиметрических исследований, нам не удалось найти в технической литературе достаточно содержательных работ по этой теме.

Рассмотрение изложенных выше экспериментальных данных показывает, что исследование суспензии без добавки и с умеренной дозировкой добавок является реологическими сложными упруго-вязко-пластическими телами. При повышении дозировки разжижающих добавок их упругие и пластические свойства резко уменьшаются, сходя почти до 0, и они превращаются почти в ньютоновские жидкости с вязкостью, не зависящей от градиента скорости сдвига.

Анализ приведенных на рисунке 6 экспериментальных данных [10] показывает, что в области пластической вязкости цементных суспензий до 0,5 Па·с расплыв конуса не зависит от последней. В области пластической вязкости 0,3–0,45 Па·с наблюдается достаточно четкая корреляция между пластической вязкостью и расплывом конуса. Когда пластическая вязкость превышает 0,46 Па·с, расплыв конуса РК перестает зависеть от нее.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Взаимосвязь между пластической вязкостью и РК зависит от степени разжижения, которая определяется дозировками добавок.

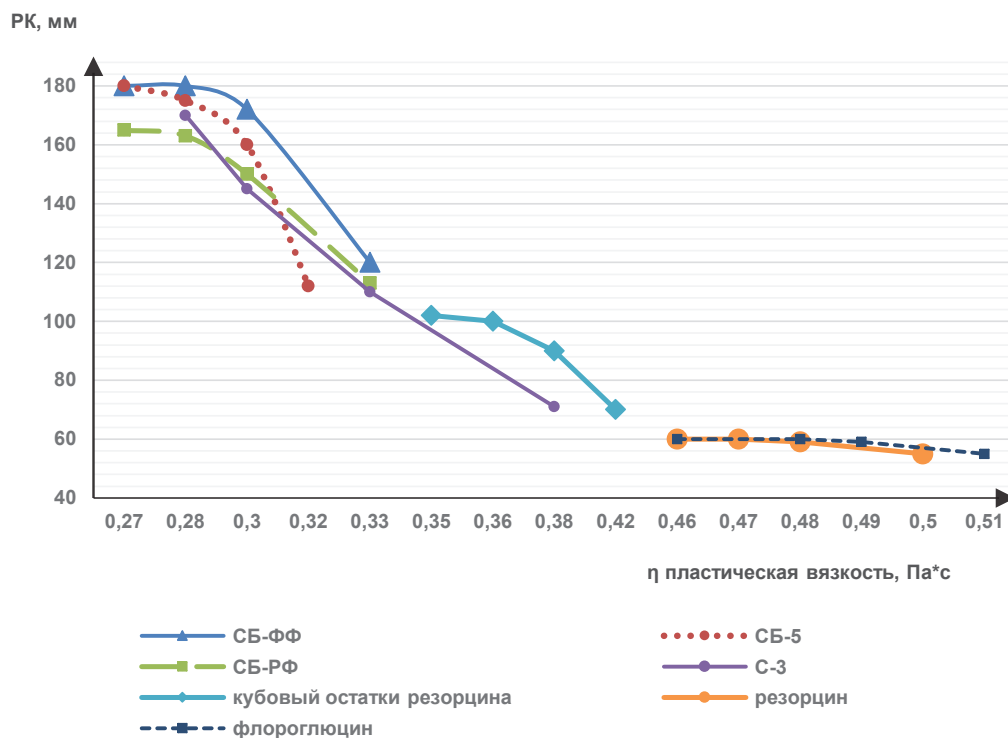


Рисунок 6 – Зависимость значения расплыва мини-конуса цементных суспензий от пластической вязкости цементных суспензий с различными дозировками добавок-разжижителей

Figure 6 – Dependence of the values of the mini-cone spreads in cement slurries on the plastic viscosity of cement suspensions with different dosages of additives-diluents

Величина расплыва конуса, особенно в области умеренных дозировок добавок, адекватно отражает реологические свойства цементных систем. При больших величинах пластической вязкости $\eta_{пл} > 0,4 - 0,5$ Па·с, расплыв конуса слабо отражает реологические свойства дисперсных систем. Таким образом, расплыв конуса не рекомендуется использовать для характеристики текучести суспензий с малой и высокой пластической вязкостью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рахимбаев Ш.М., Шахова Л.Р., Твердохлебов Д.В. Реологические свойства пеноцементных систем с добавкой анионного пенообразователя // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2003. № 4. С. 6–14.
2. Твердохлебов Д.В. Влияние компонентного состава на реологические и другие технологические свойства пеноцементных смесей // Дисс...канд. техн. наук 05.23.05. – Белгород, 2006. 148 с.
3. Донец А.В., Бабушкин В.И., Плугин А.А., Рахимбаев Ш.М., Олефир И.А. Контроль технологичности строительных смесей с помощью прибора ЭШ-1 // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2003. № 5. С. 40–45.
4. Baoguo M.A., Huixian Wang. Rheological properties of self-compacting concrete paste containing chemical admixtures. Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed. 2013, Volume 28, Issue 2, pp 291–297.
5. Hsu K.C., Chiu J.J., Chen S.D. Effect of addition time of a superplasticizer on cement adsorption and on concrete workability. Cement and Concrete Composites, 1999, 21(5–6), 425–430.
6. Рейнер М. Реология. М: Наука. 1965. 223 с.
7. Petit J.Y., Wirquin E., Helnan-Moussa B. Effect of W/C and superplasticizer type on rheological parameters of SCC repair mortar for gravitational or light pressure Injection. Cement and Concrete Composites, 2011, 33(10), pp. 1050–1056.
8. Перцев В.Т., Леденев А.А. Разработка эффективных комплексных органоминеральных добавок для регулиро-

вания реологических свойств бетонных смесей: монография. Воронеж: Воронежский ГАСУ, 2012. 136 с.

9. Papo A., Piani L. Effect of various superplasticizers on the rheological properties of portland cement pastes. Cement and Concrete Research. 2004. Volume 34. Issue 11. pp. 2097–2101.

10. Слюсарь А.А. Реологические свойства и агрегативная устойчивость водных минеральных суспензий с модификаторами на основе оксифенолфурфурольных олигомеров // Дисс. д.т.н. 02.0.11. Белгород, 2009. 408 с.

11. Ming L., Jiaheng L., Yao B., Xiaodi D., Qinglin Z., Xuqing Z. Preparation of polycarboxylate-based superplasticizer and its effects on zeta potential and rheological property of cement paste. Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed. 2015. Volume 30. Issue 5. pp. 1008 –1012.

12. Menon S.M. Sathyan D., Anand K.B. Studies on rheological properties of superplasticised PPC paste. International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCET), 2017. Volume 8. Issue 10. pp. 939–947.

13. Рахимбаев Ш.М. Регулирование технологических свойств тампонажных растворов // Ташкент: ФАН, 1976. 159 с.

14. Chiara F.F., Karthik H.O., Russell H. The influence of mineral admixtures on the rheology of cement and concrete. Cement and Concrete Research, 31(2), 2000. pp. 245–255.

15. Рахимбаев Ш.М., Толыпина Н.М., Хахалева Е.Н. Влияние мелкого заполнителя из песка на эффективность действия добавок-разжижителей // Вестник СибАДИ. 2016. № 3 (49). С. 74–79.

16. Рахимбаев Ш.М., Толыпина Н.М., Карпачева Е.Н. Эффективность действия добавок пластифицирующего действия в зависимости от качества песка // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. № 4. С. 59–61.

17. Рахимбаев Ш.М., Толыпина Н.М., Карпачева Е.Н. Катионоактивная добавка для разжигания цемента-песчаных смесей // Бетон и железобетон. 2013. № 6. С. 9–10.

18. Лыков А.В., Шульман З.П. Предисловие. Реофизика и реодинамика текучих систем. Минск: Наука и техника. 1970. С. 3–4.

19. Матвеев О.И. Цементные системы с добавкой экологически чистых модификаторов // Дисс...канд. техн. наук 05.23.05. Белгород, 1999. 160 с.

20. Пивинский Ю.Е. Керамические вяжущие и керамобетоны. М.: Металлургия, 1990. 270 с.

INTERRELATION BETWEEN PLASTIC VISCOSITY OF CEMENT SYSTEMS AND THEIR RHEOLOGICAL CHARACTERISTICS

Sh. M. Rakhimbaev, N. M. Tolypina, E. N. Khakhaleva

ABSTRACT

Introduction. The theoretical basis for regulating the mobility and workability of concrete mixtures and other rheologically complex bodies is rheology. The authors give a clarification of the physical meaning of the terms plasticizer, superplasticizer, diluent of cement systems.

Materials and methods. In the construction industry, suspensions and pastes are widely used to characterize the rheological properties of the cone spill, which does not always ensure the adequacy of their mobility. It has been found that the relationship between the plastic viscosity and the expansion of the cone depends on the degree of dilution of their modifying additives.

Results. It is shown that the value of cone expansion, especially in the field of moderate doses of additives, adequately reflects the rheological properties of cement systems. With large and small values of plastic viscosity, the cone decay weakly reflects the rheological properties of disperse systems.

Discussion and conclusions. Recommendations on the rational use of rasplav cone to characterize the technological properties of cement systems are given in the article.

KEYWORDS: cement systems, concrete mix, plasticizer, cone spill, yield stress, plastic viscosity, rheological properties.

The article was prepared within a development program of the Base University on the basis of BSTU named after V. G. Shukhov

REFERENCES

1. Rakhimbaev S.M., Shakhova L.R., Tverdokhlebov D.V. Rheological properties of procement systems with anion foaming agent additive. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhov*, 2003, no. 4, pp. 6-14.
2. Tverdokhlebov D.V. the Influence of component composition on the rheological and technological properties of foam-cement composites. Diss. kand. tech. sciences 05.23.05. Belgorod, 2006, 148 p.
3. Donets A.V., Babushkin V.I., Plugina A.A. Rakhimbaev S.M., Olefir I.A. Control techno-logic mixes with the help of the device EL-1. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhov*, 2003, no. 5, pp. 40-45.
4. Baoguo M.A., Huixian Wang. Rheological properties of self-compacting concrete paste containing chemical admixtures. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* 2013, Volume 28, Issue 2, pp 291-297.
5. Hsu K.C., Chiu J.J., Chen S.D. Effect of addition time of a superplasticizer on cement adsorption and on concrete workability. *Cement and Concrete Composites*, 1999, 21(5-6), pp. 425-430.
6. Reiner M. Rheology. Moscow. *Science*, 1965. 223 p.
7. Petit J.Y., Wirquin E., Helnan-Moussa B. Effect of W/C and superplasticizer type on rheological parameters of SCC repair mortar for gravitational or light pressure Injection. *Cement and Concrete Composites*, 2011, 33(10), pp. 1050-1056.
8. Pertsev V.T., Ledenev, A.A., [Development of effective complex organic-mineral additives to regulate the rheological properties of concrete mixtures: monograph]. Voronezh. Voronezh GASU, 2012. 136 p.
9. Papo A., Piani L. Effect of various superplasticizers on the rheological properties of portland cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 2004, Volume 34, Issue 11, pp. 2097-2101.
10. Slusar A.A. Rheological properties and aggregate stability water mineral aqueous suspensions with modifiers based on oxygenotherapy oligomers. Diss. Ph. D. 02.0.11. Belgorod, 2009. 408 p.
11. Ming L., Jiaheng L., Yao B., Xiaodi D., Qinglin Z., Xuqing Z. Preparation of polycarboxylate-based superplasticizer and its effects on zeta potential and rheological property of cement paste. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* 2015, Volume 30, Issue 5, pp. 1008-1012.
12. Menon S.M. Sathyan D., Anand K.B. Studies on rheological properties of superplasticised PPC paste. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCET)*, 2017, Volume 8, Issue 10, pp. 939-947.
13. Rakhimbaev S.M. Regulation of technological properties of cement slurries. Tashkent. *FAN*, 1976, 159 p.
14. Chiara F.F., Karthik H.O., Russell H. The influence of mineral admixtures on the rheology of cement and concrete. *Cement and Concrete Research*, 31(2), 2000, pp. 245-255.
15. Rakhimbaev S.M., Tolypina N.M. Hahaleva E.N. Influence of fine aggregate of sand on the efficiency of additives-thinners. *Vestnik SibADI*, 2016, no. 3 (49), pp. 74-79.
16. Rakhimbaev S.M., Tolypina N.M. Karpacheva E.N. The effectiveness of additives plasticizing actions depending on quality of sand. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhov*, 2013, no. 4, pp. 59-61.
17. Rakhimbaev S.M., Tolypina N.M. Karpacheva E.N. Cationic additive for Razzie Deposit cement-sand mix. *Concrete and reinforced concrete*, 2013, no. 6, pp. 9-10.

Поступила 25.01.2018, принята к публикации 20.04.2018.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Рахимбаев Шарк Матросовович (Белгород, Россия) – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (308012, Россия, г. Белгород, ул. Костюкова 46, e-mail: tolypina.n@yandex.ru).

Shark M. Rakhimbayev (Belgorod, Russia) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Construction Materials, Products and Structures, Belgorod State Technological University named after V.G. Shoukhov (308012, Russia Belgorod, 46, Kostyukov St., e-mail: tolypina.n@yandex.ru).

Толыпина Наталья Максимовна (Белгород, Россия) – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (308012, Россия, г. Белгород, ул. Костюкова 46, тел. e-mail: tolypina.n@yandex.ru).

Natalia M. Tolypina (Belgorod, Russia) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Construction Materials, Products and Structures, Belgorod State Technological University named after V.G. Shoukhov (308012, Russia Belgorod, 46, Kostyukov St., e-mail: tolypina.n@yandex.ru).

Хахалева Елена Николаевна (Белгород, Россия) – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (308012, Россия, г. Белгород, ул. Костюкова 46, тел. e-mail: hahaleva@intbel.ru).

Elena N. Khakhaleva (Belgorod, Russia) – Candidate of Technical Sciences, Associate professor, Department of Construction Materials, Products and Structures, Belgorod State Technological University named after V.G. Shoukhov (308012, Russia Belgorod, 46, Kostyukov St., e-mail: hahaleva@intbel.ru).

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Рахимбаев Ш.М. Постановка задачи исследования, анализ результатов исследования, общее руководство.

Толыпина Н.М. Проведение экспериментальной части исследования, анализ результатов исследования.

Хахалева Е.Н. Обработка результатов исследования, оформление статьи.