

## ОЦЕНКА РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ С ПОЛУЧЕНИЕМ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

© 2016 В. Т. Перцев<sup>1</sup>, А. А. Леденев<sup>2</sup>, С. М. Усачев<sup>1</sup>, А. М. Усачев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Воронежский государственный архитектурно-строительный университет,  
ул. 20-летия Октября, 84, 394006 Воронеж, Россия,

<sup>2</sup>Воронежский институт государственной противопожарной службы  
Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны,  
чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий  
ул. Краснознаменная, 231, 394052 Воронеж, Россия  
e-mail: sergey.usachev@mail.ru

Поступила в редакцию 29.03.2016 г.

**Аннотация.** Работа посвящена изучению реологических свойств дисперсных систем в условиях сдвига. Установлено влияние удельной поверхности твёрдой фазы, добавок ПАВ и водотвердого отношения на структурно-реологические свойства обводненных строительных смесей. Показано, что технические характеристики реологических свойств строительных смесей не всегда дают адекватную оценку проявления этих свойств, так как оцениваются стандартными техническими показателями (осадкой конуса, расплывом и другими), не учитывающими реальных величин предельного напряжения сдвига и эффективной вязкости. Так, например, строительные смеси, имеющие одинаковую осадку конуса, могут характеризоваться абсолютно разными величинами предельного напряжения сдвига или эффективной вязкости.

**Ключевые слова:** дисперсные системы, строительные смеси, реологические свойства систем.

### ВВЕДЕНИЕ

В связи с расширением в практике строительства объемов выпуска растворных, бетонных и других строительных смесей, модифицированных различными добавками [1], возникает необходимость в оценке проявления их реологических свойств [2—3]. Принятые в стандартах технические показатели реологических свойств строительных смесей не всегда дают адекватную оценку проявления этих свойств. На практике требуется получение смесей равной удобоукладываемости, оцениваемой стандартными техническими показателями (осадка конуса, расплыв и другими), но в то же время с различными величинами реологических свойств, характеризующими механическое поведение смесей при внешних воздействиях: предельное напряжение сдвига, эффективная вязкость. Применение данных показателей позволит оценить структурно-механические свойства систем и использовать добавки, которые обеспечат сохра-

нение структуры строительных смесей при транспортировании и в то же время высокую текучесть при формовании.

Целью данной работы является исследование влияния добавок различного вида и механизма действия на реологические свойства строительных смесей с получением количественных показателей, характеризующих их структурно-механическое поведение.

### СЫРЬЕВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе в качестве добавок целенаправленно выбраны характерные представители пластифицирующе-водоредуцирующих добавок — поверхностно-активных веществ (ПАВ) различного вида. Суперпластификатор (СП) С-3 на основе сульфированных нафталинофор-мальдегидных соединений относится к группе анионоактивных ПАВ, содержит смесь олигомеров и полимеров, которые являются основой «активного вещества», и непро-

реагировавшую соль —  $\beta$ -нафталинсульфокислоты ( $\beta$ -соль) и сульфата натрия. Суперпластификатор Полипласт СП-3 на основе смеси полинафталинметилсульфонатов натрия, лигносульфонатов технических, промышленной смеси тиосульфата и роданида натрия. Суперпластификаторы представляют собой анионоактивные органические вещества коллоидного размера с большим количеством полярных групп в цепи. Принцип действия таких ПАВ в цементных системах — электростатическое диспергирование — основывается на сильном смещении  $\zeta$  — потенциала частиц цемента в отрицательную область. Адсорбируясь на поверхности частиц цемента, молекулы ПАВ создают на поверхности утолщенную оболочку со значительным отрицательным потенциалом и тем самым повышают эффект диспергации частиц твердой фазы, что обеспечивает их пластифицирующее — водоредуцирующее действие в цементных системах. Комплексная добавка ГПМ-Ж по основному эффекту действия относится к СП. Механизм действия ГПМ-Ж аналогичен вышеописанному.

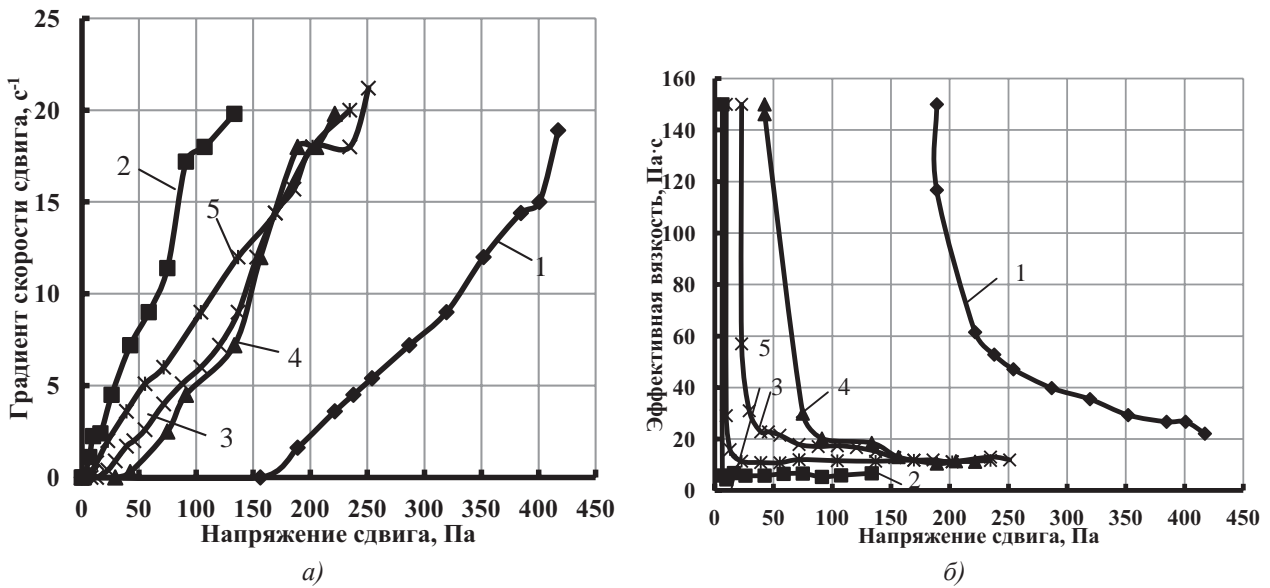
Гиперпластификатор (ГП) Melflux 2651F на основе поликарбоксилатов включает основную карбоксилсодержащую цепь — основу с отрицательными зарядами, которая адсорбируется на цементной частице и боковые полиэтиленоксидные (полиэтиленгликольные) цепи. Именно боковые цепочки создают адсорбционную объемную защитную оболочку вокруг частиц твердой фазы, предотвращая их агрегирование и способствуя взаимному «стерическому» отталкиванию. Цементные частицы с такими молекулами на поверхности находятся на определенном расстоянии друг от друга, что обеспечивает повышенную подвижность смеси.

Дозировка добавок составляла 0.4 % от массы твердого вещества. Исследования проводились как на модельных системах — водных дисперсиях, основой которых являлись портландцемент, молотый кварцевый песок, молотый известняк Елецкого карьера, так и на реальных мелкозернистых бетонных смесях с использованием портландцемента ОАО «Осколцемент» марки ПЦ 500 Д0 (ЦЕМ I 42.5Н) и кварцевого песка Хохольского карьера Воронежской области в соотношении цемент : песок равном 1 : 3. Все модельные системы имели удельную площадь поверхности твердой фазы от 300 до 700, реальные системы — 600 м<sup>2</sup>/кг. Удельная площадь поверхности определялась на приборе ПСХ-2. Реологические свойства: предельное напряжение сдвига  $\tau_0$ , (Па), минимальная эф-

фективная вязкость  $\eta_{эфф.min}$  (Па·с) определялись с помощью ротационной вискозиметрии на приборах РВ-4 и ВВ-2000. Для сравнительного анализа реологические свойства определялись также в технических показателях (см) с помощью вискозиметра Суттарда (расплав конуса) и стандартного конуса (осадка конуса). Сущность данных методов состоит в определении диаметра расплыва цементного теста (бетонной смеси), вытекающих из полого цилиндра (конуса) без дна. Цилиндр (конус) устанавливают на основание, заполняют цементным тестом (бетонной смесью), излишки срезают линейкой, затем цилиндр (конус) поднимают вверх. Диаметр расплыва цилиндра (осадка конуса) измеряют непосредственно после поднятия цилиндра (конуса) в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

**Исследования на модельных системах.** На первом этапе работы были проведены испытания на модельных водных дисперсиях, состоящих из одного молотого твердого компонента и воды. Исследовалось влияние вида добавок на реологические свойства систем при равной удельной поверхности твердой фазы и водотвердом (В/Т) отношении. Результаты исследований на примере системы «цемент—вода» (рис. 1) и обобщенные данные на других водных дисперсиях (табл. 1) показали, что применение добавок оказывает значительное влияние на изменение реологических характеристик изученных систем [4]. Введение добавок позволяет существенно уменьшить величину предельного напряжения сдвига ( $\tau_0$ ), в то же время резко снижаются значения напряжения сдвига, соответствующие переходу систем к предельно разрушенной структуре с минимальной величиной эффективной вязкости ( $\eta_{эфф.min}$ ), снижается также и величина расплыва систем по вискозиметру Суттарда (табл. 1).

Несмотря на общую тенденцию изменения реологических свойств, действие добавок ПАВ различного вида в дисперсных системах существенно отличается. Установлено, что для всех исследуемых дисперсных систем наибольшее влияние на реологические параметры  $\tau_0$  и  $\eta_{эфф.min}$  оказывает добавка ГП Melflux 2651F, (табл. 1). Например, для цементно-водной системы  $\tau_0$  снижается с 156.4 Па до 1.6 Па,  $\eta_{эфф.min}$  — с 22.1 Па·с до 5.3 Па·с. Влияние на реологические свойства других используемых СП сравнительно меньше. Эффективность их действия уменьшается в следующей последовательности: ГПМ-Ж, С-3, Полипласт СП-3.



**Рис. 1.** Влияние вида добавок ПАВ на реологические свойства системы «цемент—вода» при  $V/T=0.32$  в координатах а) градиент скорости сдвига — напряжение сдвига, б) эффективная вязкость — напряжение сдвига:  
 1 — без добавки; 2 — с ГП Melflux 2651F; 3 — с СП С-3; 4 — с Полипласт СП-3; 5 — с ГПМ-Ж

**Таблица 1.** Влияние вида ПАВ на реологические характеристики дисперсных систем при  $V/T = 0.32$

Вид системы	Предельное напряжение сдвига, $\tau_0$ , Па					Минимальная эффективная вязкость, $\eta_{эфф\ min}$ , Па·с					Распływ по Суттарду, см				
	без добавок	Melflux 2651F	С-3	СП-3	ГПМ-Ж	без добавок	Melflux 2651F	С-3	СП-3	ГПМ-Ж	без добавок	Melflux 2651F	С-3	СП-3	ГПМ-Ж
«цемент—вода»	156.4	1.6	13.0	29.3	8.1	22.1	5.3	11.2	11.4	11.2	0.0	> 30.0	15.5	9.5	20.5
«МОЛОТЫЙ ПЕСОК—вода»	58.6	3.2	9.8	16.3	6.5	11.4	6.8	7.6	8.7	7.6	9.0	> 30.0	29.0	22.0	30.0
«МОЛОТЫЙ ИЗВЕСТНЯК—вода»	26.1	0.0	0.0	1.6	0.0	7.3	1.4	3.6	5.8	2.5	14.0	> 30.0	> 30.0	> 30.0	> 30.0

Важным в практическом отношении является сопоставление результатов испытаний реотехнологических характеристик исследуемых дисперсных систем (расплыв цилиндра) и реологических показателей (предельное напряжения сдвига, эффективная вязкость), проявляемых при равной подвижности. Равная подвижность дисперсных систем достигалась подбором В/Т-отношения для получения одинаковой консистенции смесей. Данная методика, аналогичная определению реологических характеристик бетонных смесей по ГОСТ (осадка или расплыв конуса), позволяет определять реологические характеристики дисперсных систем только в технических показателях. Результаты ис-

пытаний представлены на рис. 2 и в табл. 2. Установлено, что технические показатели неадекватно оценивают реологические свойства обводненных дисперсных систем. Так, при равном расплыве по Суттарду исследуемые обводненные дисперсные системы обладают наименьшими значениями  $\tau_0$ , и максимальной величиной  $\eta_{эфф\ min}$  при использовании ГП Melflux 2651F, для которого преобладающим является «стерический» объемный механизм действия. В свою очередь системы, содержащие СП с электростатическим механизмом действия: С-3, Полипласт СП-3 и ГПМ-Ж, обладают наибольшими значениями  $\tau_0$ , а  $\eta_{эфф\ min}$  имеет минимальные показатели во всех испытанных системах.

**Таблица 2.** Влияние вида добавок на реологические характеристики дисперсных систем, проявляемые при равном расплыве по Суттарду (расплыв 13—14 см)

Вид системы	Характеристики систем при введении добавок									
	предельное напряжение сдвига, $\tau_0$ , Па					минимальная эффективная вязкость, $\eta_{эфф\ min}$ , Па·с				
	без добавки	Melflux 2651F	С-3	СП-3	ГПМ-Ж	без добавки	Melflux 2651F	С-3	СП-3	ГПМ-Ж
«цемент— вода»	41.1	15.0	55.4	54.1	31.0	8.0	26.3	14.2	10.8	16.7
«молотый песок— вода»	23.8	17.2	46.6	22.8	22.8	6.4	20.4	16.6	7.5	13.0
«молотый известняк— вода»	30.0	28.0	34.5	32.8	31.0	5.3	67.8	34.3	16.7	23.1

Такое различие в изменении реологических свойств обводненных дисперсий обусловлено механизмом действия ПАВ. Применение ГП Melflux 2651F вследствие значительно больших сил «сте-

рического» объемного отталкивания [5, 6] обеспечивает минимальные величины  $\tau_0$ . В свою очередь, высокие показатели  $\eta_{эфф\ min}$  могут быть объяснены наличием в структуре молекулы ГП Melflux 2651F

боковых полимерных цепей (рис. 3). В процессе течения полимерные цепи гибких молекул могут переплетаться. Взаимная ориентация боковых полимерных цепей в процессе их течения являются причиной повышения вязкости по сравнению

с использованием СП с «электростатическим» механизмом действия, который обеспечивается энергией ионного взаимодействия анионных групп ПАВ с отдельными активными центрами поверхности частиц твердой фазы.

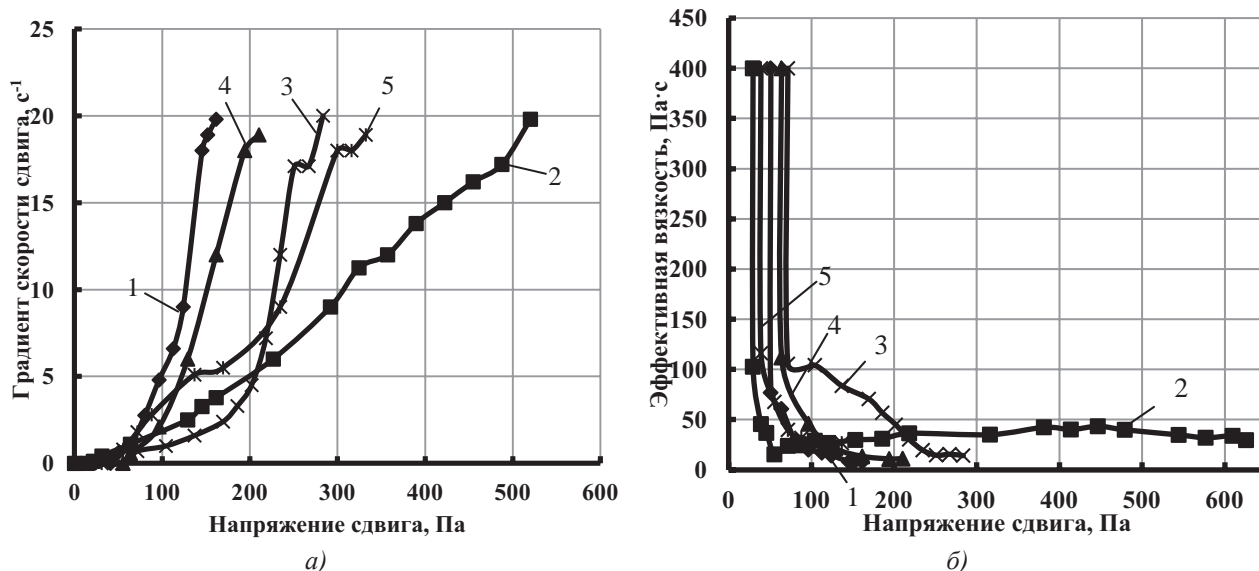


Рис. 2. Влияние вида добавок ПАВ на реологические свойства дисперсной системы «цемент—вода» при равном распыле по Сутгарду (распыл 13—14 см) в координатах а) градиент скорости сдвига — напряжение сдвига, б) эффективная вязкость — напряжение сдвига:

1 — без добавки; 2 — с ГП Melflux 2651F; 3 — с СП С-3; 4 — с СП Полипласт СП-3; 5 — с ГПМ-Ж

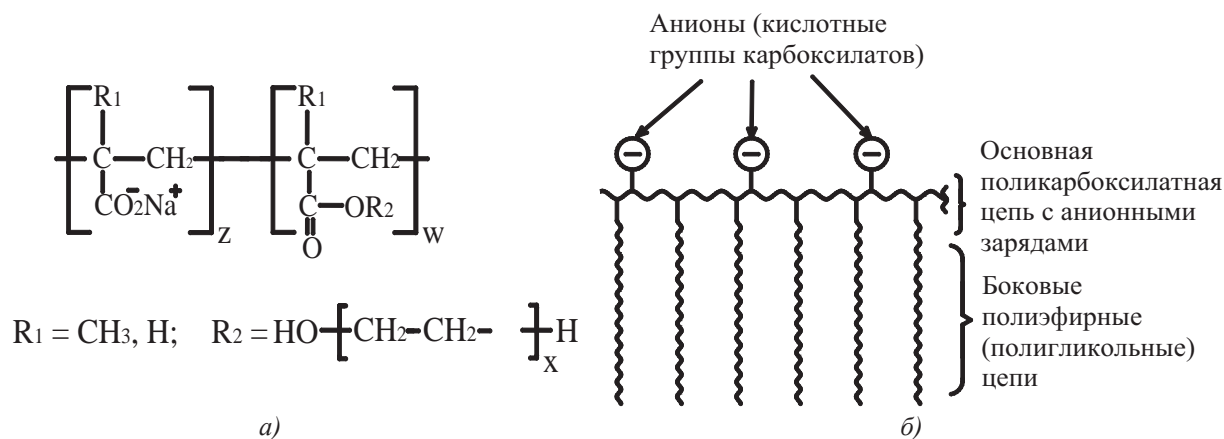


Рис. 3. Структурная формула (а) и строение макромолекулы (б) поликарбоксилатного ГП Melflux 2651F [7]

Полученные экспериментальные данные по влиянию на реологические характеристики обводненных дисперсных систем добавок ПАВ, являются определяющими факторами для получения строительных смесей с требуемыми реологическими показателями, исходя из условий их применения.

На следующем этапе работы проводились испытания на мелкозернистых бетонных смесях.

В ходе исследований установлено (рис. 4), что полученные данные соотносятся с результатами, выполненными на модельных дисперсных системах. Определено, что реотехнологические характеристики бетонных смесей, оцениваемые по величине осадки конуса, не согласуются с такими реологическими показателями как предельное напряжение сдвига и эффективная вязкость. Так, при равной подвижности использование добавки

Melflux 2651F позволяет получать бетонные смеси с наименьшим значением  $\tau_0 = 63.6$  Па и максимальной величиной  $\eta_{эфф\ min} = 44.7$  Па·с. В свою очередь для бетонных смесей, в которых применялись

модификаторы с СП С-3 и Полипласт СП-3,  $\tau_0$  выше и составляет 88.0 и 91.3 Па, а величина  $\eta_{эфф\ min}$  имеет минимальные показатели 15.8 и 18.3 Па·с соответственно.

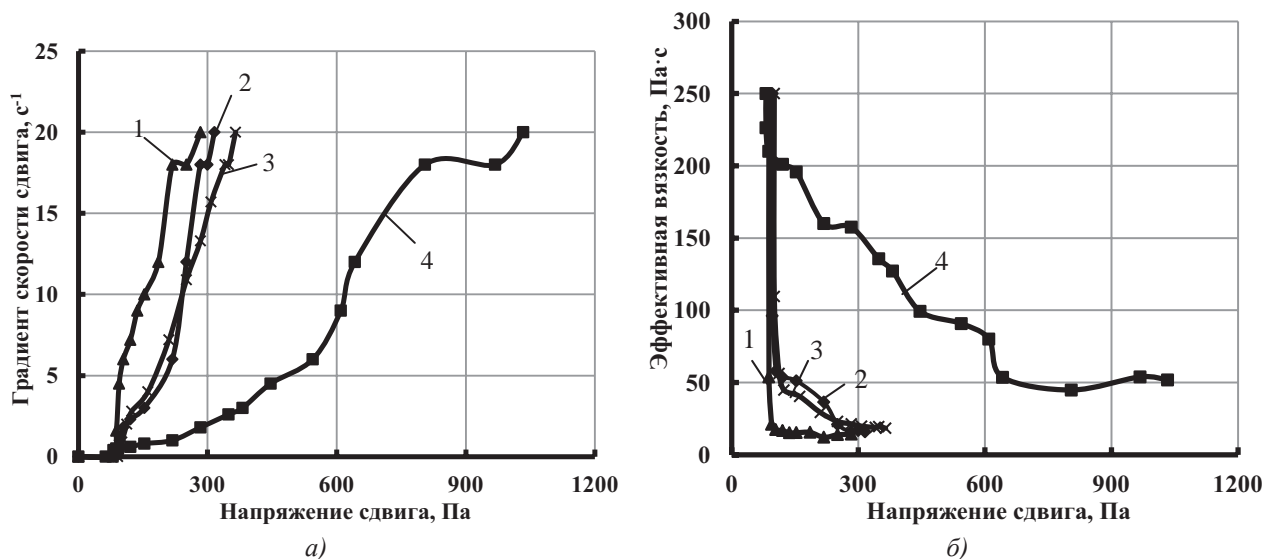


Рис. 4. Влияние вида добавок ПАВ на реологические свойства бетонных смесей при равной осадке конуса (ОК = 15 см) в координатах а) градиент скорости сдвига — напряжение сдвига, б) эффективная вязкость — напряжение сдвига:

1 — без добавки; 2 — с добавкой С-3; 3 — с добавкой Полипласт СП-3; 4 — с добавкой Melflux 2651F

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенные исследования показали, что варьируя видами ПАВ, можно получать строительные смеси с различными величинами реологических показателей: предельным напряжением сдвига —  $\tau_0$  и эффективной вязкостью —  $\eta_{эфф\ min}$ . При этом установлено, что реотехнологические характеристики строительных смесей, оцениваемые по величине осадки или расплыва конуса, не всегда согласуются с реологическими показателями:  $\tau_0$  и  $\eta_{эфф\ min}$ .

С увеличением удельной поверхности частиц твердой фазы в обводненных системах, что и было ожидаемо, наблюдается увеличение предельного напряжения сдвига и минимальной эффективной вязкости. Например, при увеличении удельной поверхности частиц молотого песка с 300 до 700 м<sup>2</sup>/кг повышается в 1.7 раз, а  $\eta_{эфф\ min}$  — в 1.5 раза. Увеличение удельной площади поверхности свыше 700 м<sup>2</sup>/кг не целесообразно из-за существенного роста  $\tau_0$  и  $\eta_{эфф\ min}$ .

Полученные данные важны в практическом отношении для производства строительных смесей с требуемыми реологическими характеристиками, исходя из условий реализации процессов транс-

портирования и формирования, а также для регулирования параметров этих технологических переделов. Например, использование ГП Melflux 2651F следует рекомендовать для получения литевых и самоуплотняющихся смесей, формирование которых осуществляется с незначительными внешними воздействиями или без них, так как в данном случае сочетается низкое  $\tau_0$ , которое определяет максимальную текучесть и повышенное значение  $\eta_{эфф\ min}$ , что обеспечивает стабильность и связность смеси при формировании. Применение СП С-3 и Полиспласт СП-3 рекомендовано для строительных смесей, укладка и уплотнение которых сопровождается внешними вибрационными воздействиями. В данном случае высокое значение  $\tau_0$  будет способствовать сохранению структуры смесей при динамических воздействиях, например при транспортировке, в то же время при вибрационном воздействии такие смеси хорошо укладываются за счет снижения  $\eta_{эфф\ min}$ .

*Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и правительства Воронежской области в рамках научного проекта № 16-43-360174 р\_а.*



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баженов Ю. М., Демьянова В. С., Калашников В. И. *Модифицированные высококачественные бетоны*. Москва, АСВ, 2006, 368 с.
2. Урьев Н. Б. *Физико-химические основы технологии дисперсных систем и материалов*. Москва, Химия, 1988, 256 с.
3. Круглицкий Н. Н. *Основы физико-химической механики*. Киев, Вища школа, 1977, 136 с.
4. Перцев В. Т., Леденев А. А. *Разработка эффективных комплексных органоминеральных добавок для регулирования реологических свойств бетонных смесей*. Воронеж, Воронежский ГАСУ, 2012, 136 с.
5. Баженов Ю. М. *Технология бетона*. Москва, АСВ, 2007, 528 с.
6. Каприелов С. С., Батраков В. Г., Шейнфельд А. В. // *Бетон и железобетон*, 1999, № 6, с. 6—10.
7. Леденев А. А., Усачев С. М., Перцев В. Т., Рудаков О. Б. // *Научный вестник ВГАСУ. Строительство и архитектура*, 2013, № 2 (30), с. 49—54.

## EVALUATION OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF BUILDING MIXES WITH OBTAINING ADDITIONAL QUANTITATIVE CHARACTERISTICS

©2016 V. T. Perzev, A. A. Ledenev<sup>1</sup>, S. M. Usachev, A. M. Usachev

*Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering,  
Str. 20-letiya October, 84, 394006 Voronezh, Russia*

*<sup>1</sup>Voronezh Institute of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disaster, Str. Krasnoznamennaya, 231, 394052 Voronezh, Russia  
e-mail: sergey.usachev@mail.ru*

Received 29.03.2016.

**Abstract.** The purpose of this work is to study the influence of various types of additives and mechanism on the rheological properties of building mixes with obtaining quantitative characteristics in physical units.

To studied the rheological properties of dispersive-granular system in conditions of shift rotation viscometer method. As additives to selected surfactants of different chemical basis: superplasticizer C-3, Polyplast CP-3; integrated chemical additive GPM-G; hyperplasticizer — Melflux 2651F. The research were performed on model systems — water dispersions of Portland cement, ground sand, limestone with specific surface area from 300 to 700 m<sup>2</sup>/kg and fine-grained concrete mixes.

The results of research have shown that varying types of surfactants of different nature, it is possible to obtain mixtures with different values of rheological properties: limit voltage shift ( $\tau_0$ ) and effective viscosity ( $\eta_{eff,min}$ ). To found that the standard characteristics of the rheological properties of building mixes are not always compatible with the rheological parameters, data obtained in physical units.

The obtained in conclusions information are important in practical terms for the production of mortars with the desired rheological characteristics, on the basis of the terms and conditions of transportation and molding processes, as well as for regulation of these processes.

**Keywords:** dispersive-granular system, rheological properties of systems.

REFERENCES

1. Bazhenov Y. M., Demianova V. S., Kalashnikov V. I. *Modified high quality concretes*. Moscow, ABU Publ., 2006, 368 p.
2. Uriev N. B. *Physico-Chemical Basis of Disperse Systems and Materials*. Moscow, Chemistry Publ., 1988, 256 p.
3. Kruglizkiy N. N. *The basis of physico-chemical mechanics*. Kiev, Visha Shcola Publ., 1977, 136 p.
4. Perzev V. T., Ledenev A. A. *Development of Effective Integrated Organic Additives for Regulation of Rheological Properties of Concrete Mixtures*. Voronezh, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering Publ., 2012, 136 p.
5. Bazhenov Y. M. *Concrete Technology*. Moscow, ABU Publ., 2007, 528 p.
6. Kapriellov S. S., Batrakov V. G., Sheinfeld A. V. *Concrete and Reinforced Concrete*, 1999, no. 6, pp. 6—10.
7. Ledenev A. A., Usachev S. M., Perzev V. T., Rudakov O. B. *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and architecture*, 2013, no. 2(30), pp. 49—54.

*Перцев Виктор Тихонович* — д. т. н., профессор, профессор кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций, Воронежский государственный архитектурно-строительный университет; тел.: +7 (473) 2715235, e-mail: perec\_v@mail.ru

*Леденев Андрей Александрович* — к. н. т., Воронежский институт государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий; тел.: +7 (473) 2778653, e-mail: ledeneff@mail.ru

*Усачев Сергей Михайлович* — к. т. н., доцент кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций, Воронежский государственный архитектурно-строительный университет; тел.: +7 (473) 2715926, e-mail: sergey.usa4ev@mail.ru

*Усачев Александр Михайлович* — к. т. н., доцент кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций, Воронежский государственный архитектурно-строительный университет; тел.: +7 (473) 2715235, e-mail: usachevam@vgasu.vrn.ru

*Perzev Victor T.* — Dr. Sci. (Eng.), Full Professor, Technology of Building Materials, Building Products and Construction Department, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering; ph.: +7 (473) 2715235, e-mail: perec\_v@mail.ru

*Ledenev Andrey A.* — Cand. Sci. (Eng.), Voronezh Institute of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disaster; ph.: +7 (473) 2778653, e-mail: ledeneff@mail.ru

*Usachev Sergey M.* — Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of Technology of building materials, building products and construction, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering; ph.: +7 (473) 2715926, e-mail: sergey.usa4ev@mail.ru

*Usachev Alexander M.* — Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of Technology of building materials, building products and construction, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering ph.: +7 (473) 2715235, e-mail: usachevam@vgasu.vrn.ru