

УДК 691

**ВЛИЯНИЕ ВИДА ЦЕМЕНТА НА СОХРАНЯЕМОСТЬ СВОЙСТВ САМОУПЛОТНЯЮЩИХСЯ БЕТОНОВ***А. С. Раев, Л. И. Касторных*

Донской государственной технической университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

[darkcrew01@mail.ru](mailto:darkcrew01@mail.ru)[likas9@mail.ru](mailto:likas9@mail.ru)

Установлено влияние минералогического и вещественного состава цемента на сохраняемость свойств тяжелых, мелкозернистых и легких самоуплотняющихся бетонных смесей. Исследования показали, что самоуплотняющийся бетон, являясь многокомпонентным материалом, содержащим суперпластифицирующие и стабилизирующие добавки, весьма чувствителен к виду и составу цемента. Сохраняемость бетонных смесей на цементе с кремнеземсодержащими минеральными добавками практически в два раза меньше, чем на цементе без минеральных добавок. Характер растекаемости смеси с течением времени зависит от водосодержания и наличия стабилизатора.

**Ключевые слова:** самоуплотняющиеся бетонные смеси, сохраняемость растекаемости, предельные напряжения сдвига, водопотребность бетонной смеси, способность к самоуплотнению.

**Введение.** При любом уровне развития технологий сохраняют актуальность вопросы снижения энергоемкости технологических процессов и трудоемкости операций, повышения производительности труда, снижения влияния негативных факторов на организм человека. Однако использование бетона в монолитном строительстве часто не решает эти проблемы, так как при выполнении работ существенные затраты идут на укладку и уплотнение бетонных смесей. Задействуется значительная рабочая сила, при этом нередки дефекты поверхности изделий, связанные с недоуплотнением.

Появление новой технологии возведения бетонных сооружений без использования виброуплотнения — технологии самоуплотняющихся бетонов (СУБ) — явилось прорывом в строительном производстве. Эта технология стала возможной благодаря появлению нового типа добавок на базе полиакрилата и поликарбоксилата, которые разработал и внедрил профессор Х. Окамура в

UDC 691

**INFLUENCE OF THE TYPE OF CEMENT ON KEEPING PROPERTIES OF SELF-COMPACTING CONCRETE***A. S. Raev, L. I. Kastornykh*

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

[darkcrew01@mail.ru](mailto:darkcrew01@mail.ru)[likas9@mail.ru](mailto:likas9@mail.ru)

The article establishes the influence of mineralogical and physical composition of cement on keeping properties of heavy, fine and light self-compacting concrete mixes. The studies have shown that self-compacting concrete, as a multi-component material containing superplasticizers and stabilizing additives is very sensitive to the type and composition of cement. The keeping of concrete mixtures of cement with silica-containing minerals is almost two times smaller than the cement without mineral additives. The nature of the spreadability of the mixture over time depends on the water content and the presence of the stabilizer.

**Keywords:** self-compacting concrete mixes, keeping of spreadability, critical shear stress, water requirement of the concrete mix, self-compacting ability.

конце 80-х годов XX столетия [1]. Действие этих добавок основано на адсорбции и создании электростатического и пространственного эффекта отталкивания, который достигается с помощью боковых гидрофобных полиэфирных цепей молекул эфира поликарбоксилата.

В российской нормативной документации (ГОСТ 25192-2012) СУБ определяется как бетон, изготовленный из бетонной смеси, способной уплотняться под действием собственного веса. За рубежом строительные фирмы широко используют СУБ на практике при возведении объектов жилищного и транспортного строительства [2]. Преимущества СУБ выгодны всем участникам строительного комплекса. Так, на этапе проектирования появляется возможность создания конструкций различных форм с утонченными деталями; на этапе строительства облегчаются бетонные работы и улучшаются условия труда; при выпуске бетонных смесей увеличивается производительность и снижаются энергозатраты. На заводах сборного железобетона благодаря СУБ возможен выпуск изделий неограниченной номенклатуры, а отсутствие вибрации увеличивает сроки службы форм [3].

**Сырье и методы исследований.** Использование СУБ в Российской Федерации ограничено из-за отсутствия нормативной базы, которая является основой для осуществления как проектных, так и бетонных работ. СУБ — это сложный и многокомпонентный материал, который чувствителен к ряду факторов (постоянство свойств сырья, точность дозирования, порядок перемешивания материалов), чем обусловлены высокие требования к техническому оснащению и компетентности специалистов.

Цель настоящей работы — оценить влияние вида цемента на сохраняемость свойств самоуплотняющихся бетонных смесей.

Сохраняемость бетонной смеси — это способность сохранять первоначальные свойства в течение требуемого времени. Применительно к самоуплотняющимся смесям эта характеристика показывает промежуток времени, по истечении которого смесь теряет способность самоуплотняться или появляются первые признаки седиментации и сегрегации. В современных условиях городского строительства принято считать, что сохраняемость смеси из тяжелого бетона должна составлять не менее 90 мин, чтобы было достаточно времени для ее транспортировки и укладки.

В исследованиях использованы следующие вяжущие материалы:

— портландцемент марки ПЦ500-Д0 цементного завода «Пролетарий»: активность 51,1 МПа; истинная плотность 3,1 г/см<sup>3</sup>; насыпная плотность 1100 кг/м<sup>3</sup>; нормальная густота цементного теста 24,75%; удельная поверхность 3520 г/см<sup>2</sup>;

— сульфатостойкий портландцемент с минеральными добавками класса ЦЕМII-42,5Н-СС Верхнебаканского завода: активность 50 МПа; истинная плотность 3,15 г/см<sup>3</sup>; насыпная плотность 1170 кг/м<sup>3</sup>; нормальная густота цементного теста 27,5%; удельная поверхность 4015 г/см<sup>2</sup>; содержание добавки (опока) — 10,2 %.

Минералогический и химический состав цементов приведен в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика цементов

Вид цемента	Состав, %						
	$C_3S$	$C_2S$	$C_3A$	$C_4AF$	$SO_3$	$MgO$	$R_2O$
ПЦ 500-Д0	63,4	15,1	5,1	13,5	3,06	0,96	0,65
ЦЕМII-42,5Н-СС	65,0	12,0	4,0	13,0	2,8	0,41	0,46

Для приготовления СУБ использовались заполнители плотной и пористой структуры:

- песок кварцевый карьера Самарский: истинная плотность  $2,65 \text{ г/см}^3$ ; насыпная плотность  $1445 \text{ кг/м}^3$ ; модуль крупности 1,23;
- щебень дробленый из песчаника фр. 5–10 мм карьера ООО «Донской камень»: истинная плотность  $2,66 \text{ г/см}^3$ ; насыпная плотность  $1395 \text{ кг/м}^3$ ; прочность 120 МПа;
- керамзит дробленый фр. 5–10 мм ОАО «КПП Ипатовский завод»: марка по плотности D500; марка по прочности П75; плотность в цементном тесте 1,1 кг/л;
- керамзитовая смесь фр. 0–10 мм: марка по плотности D700; марка по прочности П75; плотность в цементном тесте 1,15 кг/л;
- отсев дробления щебня ООО «Донской камень» фр. 0–5 мм: истинная плотность  $2,66 \text{ г/см}^3$ ; насыпная плотность  $1390 \text{ кг/м}^3$ .

В исследованиях для обеспечения растекаемости и нерасслаиваемости смесей использованы добавки:

- *Sika ViskoCrete 24 HE* (далее *VC 24HE*) — суперпластификатор на основе водной композиции модифицированных эфиров поликарбоксилата;
- *MasterGleniumACE430* (далее *MG430*) — суперпластификатор на основе эфира поликарбоксилата с эффектом быстрого набора ранней прочности бетона;
- *Sika Stabilizer 4R* (далее *S.4R*) — стабилизатор на основе крахмала;
- *Centrament Stabi M 21* (далее *S.M 21*) — стабилизатор на основе комплексной смеси микрозаполнителя и синтетических полимеров;
- *MasterMatrix 100* (далее *MM 100*) — модификатор вязкости на основе водного раствора высокомолекулярного синтетического полимера.

В ходе исследований оценивались сохраняемость растекаемости СУБ и изменение во времени реологической характеристики смеси — предельных напряжений сдвига.

Растекаемость самоуплотняющихся смесей  $D_p$  определена по диаметру расплыва конуса бетонной смеси по методике EN 12350.5-2000 (рис. 1) [4].



Рис. 1. Прибор для определения растекаемости бетонной смеси

Расплыв бетонной смеси определяется измерением диаметра расплывшейся лепешки в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Реологическая характеристика бетонной смеси — предельное напряжение сдвига — определено на приборе (рис. 2), состоящем из полого цилиндра (диаметром 100 мм, высотой 200 мм) с насадкой и стеклянного основания с разметкой.



Рис. 2. Прибор для определения предельного напряжения сдвига бетонной смеси

Расчет предельных напряжений сдвига бетонных смесей  $\tau_0$ , Па, выполнен по формуле — так же, как для цементных суспензий [5]:

$$\tau_0 = \frac{hd^2}{kD^2\rho}, \quad (1)$$

где  $h, d$  — соответственно высота и диаметр, м, цилиндра;  $\rho$  — средняя плотность бетонной смеси, кг/м<sup>3</sup>;  $k = 2$  по [6];  $D$  — диаметр расплыва бетонной смеси, м.

**Сохраняемость тяжелых СУБ.** Для проверки сохраняемости свойств тяжелых самоуплотняющихся бетонных смесей на плотных заполнителях с добавками марки *Sika* были приготовлены составы с номинальным расходом вяжущего материала 450 кг/м<sup>3</sup>: 1–3 на бездобавочном цементе, 4 и 5 — на портландцементе с минеральной добавкой (табл. 2).

Таблица 2

Изменение растекаемости тяжелых СУБ с добавками марки *Sika*

Состав	Вид цемента	Расход материала на 1 м <sup>3</sup> , кг				Диаметр расплыва смеси, см, через промежуток времени, мин									
		Цемент	Вода	VC 24HE	S.4R	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270
1	ПЦ500-Д0	458	224	6,8	–	64	64	63	60	57	54	–	–	–	–
2		453	219	6,8	2,3	43	55	56	55	52	–	–	–	–	–
3		442	269	6,6	2,2	63	63	63	65	67	65	60	57	56	54
4	ССПЦ500-Д20	468	197	7,1	–	66	66	54	–	–	–	–	–	–	–
5		446	255	4,4	0,9	64	63	43	–	–	–	–	–	–	–

Соотношение масс мелкого и крупного заполнителей принято в интервале 0,7–0,74. Бетонные смеси составов 1 и 2 приготовлены с постоянным водоцементным отношением В/Ц = 0,48.

Установлено, что текучесть смеси состава 1 без стабилизирующей добавки постепенно уменьшается, а способность к самоуплотнению (диаметр расплыва должен быть не менее 55 см) сохраняется в течение 140 мин.

У смеси состава 2 со стабилизатором *S.4R* характер изменения растекаемости другой. На стадии приготовления стабилизирующая добавка захватывает в свои ячейки молекулы воды, приводя к загустеванию и снижению растекаемости смеси. Но через 60 мин происходит стабилизация цементно-водной системы, молекулы воды перераспределяются в структуре смеси, увеличивая ее текучесть до 56 см. Затем смесь загустевает, и растекаемость уменьшается. Такой характер изменения текучести смеси не может удовлетворить потребителей, смесь нельзя отнести к категории самоуплотняющихся.

Бетонная смесь состава 3 приготовлена при условии одинаковой растекаемости смеси состава 1. Для обеспечения этого условия водопотребность смеси состава 3 увеличилась на 20 %. Этот фактор отразился на изменении ее текучести. Вначале смесь сохраняла первоначальную растекаемость 63 см, но с течением времени (через 120 мин) «лишние» молекулы воды, удерживаемые частицами стабилизатора, перераспределились в межзерновом пространстве твердой фазы и увеличили ее растекаемость до 67 см. Такой механизм действия стабилизирующей добавки обеспечивает сохранность смеси в течение 260 мин, что в два раза превышает сохранность смеси без стабилизатора.

Бетонные смеси составов 4 и 5 приготовлены на сульфатостойком цементе с минеральными добавками. Наличие кремнеземсодержащей добавки в цементе способствует резкому сокращению сохраняемости смесей. Смесь состава 4 потеряла способность к самоуплотнению через 60 мин, а смесь состава 5, содержащая стабилизатор *S.4R*, — через 45 мин. Это свидетельствует о плохой совместимости цемента класса ЦЕМП-42,5Н-СС с использованными добавками.

В табл. 3 приведена кинетика изменения предельных напряжений сдвига бетонных смесей с добавками марки *Sika* (составы 1–5 из табл. 2).

Таблица 3

Изменение предельных напряжений сдвига СУБ с добавками марки *Sika*

Состав	Вид цемента	Предельное напряжение сдвига, Па, через промежуток времени, мин					
		0	30	60	90	120	150
1	ПЦ500-Д0	16,7	16,7	17,5	20,6	26,1	36,6
2		42,2	21,6	20,4	21,6	29,3	–
3		16,5	15,7	12,45	18,2	25,7	39,0
4	ССПЦ500-Д20	15,0	16,0	39,8	–	–	–
5		16,0	20,3	42,1	–	–	–

Предельное напряжение сдвига характеризует величину внутренних напряжений, при которой пластично-вязкий материал начинает необратимо деформироваться, превращаясь в «тяжелую» вязкую жидкость [7]. Для самоуплотняющихся бетонных смесей следует выбирать пару «цемент — поликарбоксилат» (цемент + наполнитель поликарбоксилат) с наименьшим значением предельного напряжения сдвига [8]. Кинетика изменения предельных напряжений сдвига бетонных сме-

сей с добавками марки *Sika* подтверждает механизм действия стабилизатора, заключающийся в снижении скорости гидратации цемента и увеличении длительности индукционного периода.

**Сохраняемость мелкозернистых СУБ.** Оценка сохраняемости свойств мелкозернистых самоуплотняющихся бетонных смесей выполнена с использованием добавок марки *BASF* (суперпластификатор *MG430* и модификатор вязкости *MM100*) с номинальным расходом вяжущего материала  $500 \text{ кг/м}^3$  и соотношением мелкого заполнителя к цементу П : Ц = 3 (табл. 4).

Таблица 4

Изменение растекаемости мелкозернистых СУБ с добавками марки *BASF*

Состав	Вид цемента	Расход материала на $1 \text{ м}^3$ , кг				Диаметр расплыва смеси, см, через промежуток времени, мин					
		Цемент	Вода	MG430	MM100	0	30	60	90	120	150
6	ПЦ500-Д0	507	264	7,6	–	66	60	57	53	–	–
7		499	285	6,7	1,5	65	66	65	62	58	54

Бетонная смесь состава 6, содержащая только *MG430*, постепенно теряла текучесть и сохраняла способность к самоуплотнению в течение 75 мин. Текучесть смеси состава 7, включающая не только суперпластификатор, но и водоудерживающую добавку *MM100*, вначале увеличилась, а потом медленно снижалась, сохраняя способность к самоуплотнению в течение 145 мин. При этом водопотребность смеси состава 7 увеличилась на 10 %.

Кинетика изменения предельных напряжений сдвига мелкозернистых смесей с добавками марки *BASF* приведена в табл. 5 (составы 6 и 7 из табл. 4).

Таблица 5

Изменение предельных напряжений сдвига мелкозернистых СУБ с добавками марки *BASF*

Состав	Вид цемента	Предельное напряжение сдвига, Па, через промежуток времени, мин					
		0	30	60	90	120	150
6	ПЦ500-Д0	15,1	16,7	21,9	37,5	–	–
7		15,0	14,3	16,6	17,5	20,6	34,6

Изменение предельных напряжений сдвига мелкозернистых смесей с добавками марки *BASF*, так же, как и тяжелых СУБ, подтверждает замедляющее действие модификатора вязкости и снижение скорости гидратации цемента.

**Сохраняемость легких СУБ.** Для легких керамзитобетонных СУБ обеспечение реологической стабильности возможно за счет применения микрозаполнителей (инертных и активных) и микроармирующей фибры [9].

Оценка сохраняемости свойств керамзитобетонных самоуплотняющихся смесей выполнена с использованием суперпластификатора *VC24HE* и стабилизатора *S.M21* с номинальным расходом вяжущего материала  $375 \text{ кг/м}^3$  (табл. 6).

Показатели конструктивности легких керамзитобетонных СУБ

Состав	Вид цемента	Расход материала на 1 м <sup>3</sup> смеси, кг									Диаметр расплыва, см	Средняя плотность смеси, кг/м <sup>3</sup>
		Цемент	Вода	Керамзитовая смесь	Керамзит фр. 5–10 мм	Песок кварцевый	Зола уноса	VC 24HE	Stabi M21	Фибра длиной 12 мм		
8	ПЦ500-Д0	392	241	153	358	409	69,0	9,2	–	0,5	70	1630
9		368	221	144	336	384	65,0	8,6	2,1	0,5	71	1530

При совместном введении в легкобетонную смесь суперпластификатора и стабилизирующей добавки происходит резкое снижение плотности смеси (состав 9). Стабилизатор, изменяя свойства поверхности частиц твердой фазы, препятствует проникновению воды в поры и капилляры пористого заполнителя. Сила поверхностного натяжения добавки препятствует проникновению воды в поры заполнителя, тем самым количество свободной воды увеличивается, а плотность смеси снижается.

В отличие от тяжелых СУБ использование стабилизирующей добавки в керамзитобетонной смеси обеспечило снижение водопотребности смеси на 10 %. И несмотря на уменьшение количества воды сохраняемость текучести смеси состава 9 на 30 мин больше, чем смеси без стабилизирующей добавки (рис. 3).

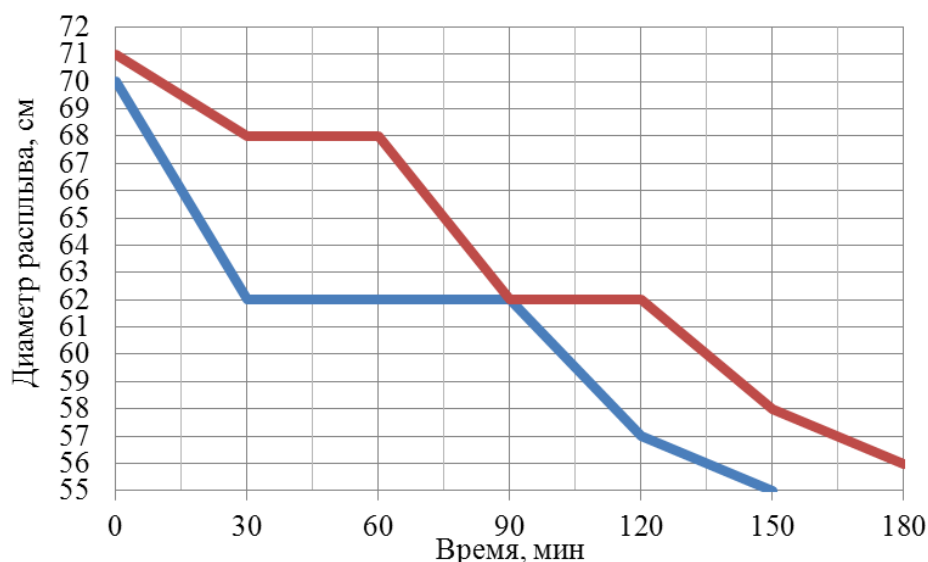


Рис. 3. Изменение растекаемости легких керамзитобетонных СУБ:  
синяя кривая — состав 8; красная кривая — состав 9

**Выводы.** Применение стабилизирующих добавок приводит к образованию трехмерной структуры «стабилизатор — вода — тонкодисперсные частицы твердой фазы», которая обеспечивает достаточную стабильность и устойчивость бетонной смеси к расслоению. Однако такой механизм действия неизбежно приводит к повышению водопотребности смеси. Кинетика изменения

пределных напряжений сдвига смесей подтверждает механизм действия стабилизатора, заключающийся в снижении скорости гидратации цемента и увеличении длительности индукционного периода.

Для обеспечения требуемой текучести смесей и получения бетона проектной прочности на конкретном цементе необходимо оптимизировать дозировку модифицирующих добавок, а также оценивать их совместимость с вяжущим материалом по реологической характеристике — предельным напряжениям сдвига.

#### **Библиографический список**

1. Okamura, H. Mix design for self-compacting concrete / H. Okamura, K. Ozawa // Concrete Library of the JSCE. — 1995. — № 25. — P. 107–120.
2. Аленкар, Р. Экономичное жилье из СУБ / Р. Аленкар, Ж. Маркон, П. Хелена // СРІ — Международное бетонное производство. — 2010. — № 6. — С. 142–147.
3. Храпко, М. СУБ: успехи и трудности / М. Храпко // ИССХ : мат-лы междунар. конф. — Санкт-Петербург, 2009. — С. 28–31.
4. EN 12350-5:2000. Испытание бетонной смеси. Часть 5: Испытание на расплыв / British Standards Institution. — 2000. — 8 с.
5. Несветаев, Г. В. Технология самоуплотняющихся бетонов / Г. В. Несветаев // Строительные материалы. — 2008. — № 3. — С. 24–28.
6. Баженов, Ю. М. Модифицированные высококачественные бетоны / Ю. М. Баженов, В. С. Демьянова, В. И. Калашников. — Москва : АСВ, 2006. — 368 с.
7. Войлоков, И. А. Самоуплотняющиеся бетоны. Новый этап развития бетоноведения / И. А. Войлоков // Бетоны. — 2008. — № 4/Б.— С. 5–8.
8. Ушеров-Маршак, А. В. Взгляд в будущее бетона / А. В. Ушеров-Маршак // Строительные материалы. — 2014. — № 3. — С. 4–5.
9. Касторных, Л. И. Исследование свойств легких самоуплотняющихся бетонов / Л. И. Касторных, Н. А. Сеницина // Вестник Южно-Уральского гос. ун-та. — 2014. — Т. 14, № 4. — С. 47–51. — (Архитектура и строительство).