

УДК 691

**ВЫБОР ХИМИЧЕСКИХ
МОДИФИКАТОРОВ ДЛЯ
ОБЕСПЕЧЕНИЯ
РАСТЕКАЕМОСТИ
САМОУПЛОТНЯЮЩИХСЯ
БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ**

А. В. Рауткин, Л. И. Касторных

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

san7935@yandex.rulikas9@mail.ru

Выполнена оценка влияния суперпластификаторов и стабилизирующих добавок нового поколения на реологические свойства самоуплотняющихся бетонных смесей. Установлено, что при выборе химических модификаторов для самоуплотняющихся бетонов необходимо проводить исследования по реологической совместимости гиперпластификаторов и стабилизаторов с конкретным цементом. Стабилизирующие добавки обладают высокой водоудерживающей способностью и повышают стойкость бетонных смесей к расслоению, но увеличивают ее водопотребность.

Ключевые слова: самоуплотняющиеся бетоны, гиперпластификаторы, стабилизаторы, модификаторы вязкости, растекаемость смесей, прочность бетона

Введение. Более 20 лет на строительных объектах развитых стран успешно применяются самоуплотняющиеся бетоны (СУБ). Такие бетоны получают из смеси, которая растекается самостоятельно, без воздействия на нее внешней энергии, но при этом сохраняет однородность, гарантированно уплотняется и полностью заполняет опалубку [1, 2].

В середине 90-х годов XX столетия в Японии профессор Х. Окамура создал и внедрил в практику новое поколение суперпластифицирующих добавок к бетону на базе полиакрилата и поликарбоксилата. Использование данных добавок сопровождалось и увеличением (по сравнению с традиционным бетоном на цементном вяжущем материале) количества тонкодисперсных частиц микронаполнителей: микрокремнезема, различных зол, молотого граншлака, известняка и др. В комплексе это позволяет получать стабильные и нераспадающиеся смеси, способные к самоуплотнению. С использованием СУБ в Японии был построен ряд уникальных сооружений, среди которых мост Акаси-Кайкё, открытый в 1998 г. (центральный пролет длиной 1991 м и две секции длиной по 960 м) [3].

UDC 691

**THE CHOICE OF CHEMICAL
MODIFIERS FOR PROVIDING SPREAD-
ABILITY OF
SELF-COMPACTING CONCRETE
MIXTURES**

A.V. Rautkin, L. I. Kastornykh

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

san7935@yandex.rulikas9@mail.ru

The article provides the assessment of the influence of superplasticizers and stabilizing additives of the new generation on the rheological properties of self-compacting concrete mixes. The authors have found that in the choice of chemical modifiers for self-compacting concrete it is necessary to conduct research on rheological compatibility of hyperplasticizers and stabilizers with the specific cement. Stabilizing additives have a high water-retaining ability and increase the resistance of concrete mixtures to phase separation and increase the demand in it.

Keywords: self-compacting concrete, hyperplasticizers, stabilizers, viscosity modifiers, spreadability, concrete strength

Благодаря своим преимуществам СУБ получил широкое распространение в Западной Европе и Северной Америке. В России СУБ пока применяется лишь при создании уникальных объектов, таких как ММДЦ «Москва-сити» [4, 5].

Производственный опыт показывает, что химические добавки, являясь модификаторами структуры бетона, в значительной степени изменяют его физико-механические характеристики и формируют себестоимость железобетонных изделий и конструкций. Должны быть всесторонне исследованы новые группы добавок для СУБ: гиперпластификаторы, стабилизаторы, модификаторы вязкости и др., влияние которых на свойства бетонных смесей и бетонов еще мало изучено [6].

Материалы и методика исследований. Цель настоящей работы — определить влияние суперпластификаторов и стабилизирующих добавок нового поколения на реологические свойства смесей и выбрать модификаторы для обеспечения требуемой растекаемости смесей и проектной прочности бетона.

В данной исследовательской работе для приготовления СУБ использованы добавки, которые в г. Ростове-на-Дону на рынке строительной химии представлены перечисленными ниже фирмами.

1. *Sika* [7]:

— *Sika ViskoCrete 24 HE (VC 24HE)* — это третье поколение высокоэффективных суперпластификаторов на основе водной композиции модифицированных эфиров поликарбоксилата, обеспечивающих очень быстрый набор ранней прочности бетона;

— *Sika Stabilizer 4R (S.4R)* — стабилизирующая добавка на основе крахмала, повышающая стойкость бетонных смесей к расслоению.

2. *MC Bauchemie* [8]:

— *MC Muraplast FK 63 (FK 63)* — гиперпластификатор на основе эфиров поликарбоксилатов, обладающий сильным разжижающим действием;

— *Centrament Stabi M21 (S.M21)* — высокоэффективный стабилизатор на основе комплексной смеси микрозаполнителя и синтетических полимеров, обеспечивающий снижение расслоения и водоотделения бетонных смесей.

3. «БАСФ Строительные системы» [9]:

— *MasterGleniumACE430 (MG430)* — суперпластификатор на основе эфира поликарбоксилата, обеспечивающий быстрый набор ранней прочности бетона;

— *MasterGlenium 115 (MG115)* — суперпластифицирующая добавка на основе эфира поликарбоксилата;

— *MasterMatrix 100 (MM100)* — модификатор вязкости на основе водного раствора высокомолекулярного синтетического полимера.

Бетонные смеси были приготовлены на бездобавочном портландцементе марки ПЦ 500-Д0-Н завода «Пролетарий» и сульфатостойком портландцементе с минеральными добавками класса ЦЕМП-42,5Н-СС Верхнебаканского завода. Основные характеристики цементов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики цементов

Показатели, единица измерения	«Пролетарий» ПЦ 500-Д0-Н ГОСТ 10178	Верхнебаканский ЦЕМII-42,5Н-СС ГОСТ 22266
Активность $R_{ц}$, МПа	51,1	50,0
Истинная плотность $\rho_{ц}$, г/см ³	3,1	3,15
Насыпная плотность $\rho_{нц}$, кг/м ³	1120	1170
Нормальная густота цементного теста, %	24,75	27,5
Удельная поверхность $S_{уд}$, см ² /г	3520	4015
Минеральная добавка — опока, %	—	10,2

Цементы заводов «Пролетарий» и Верхнебаканский выбраны для экспериментов, так как широко используются в Ростовской области и на протяжении многих лет демонстрируют стабильные показатели качества.

Для приготовления СУБ использовались заполнители: песок кварцевый карьера Самарский и щебень дробленый из песчаника карьера ООО «Донской камень» (табл. 2).

Таблица 2

Основные характеристики заполнителей

Показатели, единица измерения	Песок кварцевый ГОСТ 8736	Щебень дробленый ГОСТ 8267
Истинная плотность ρ , г/см ³	2,65	2,66
Насыпная плотность $\rho_{н}$, кг/м ³	1445	1395
Модуль крупности M_k	1,23	—
Пустотность V_n , %	45,5	47,5
Наибольшая крупность НК, мм	—	10
Прочность, МПа	—	100

Растекаемость самоуплотняющихся смесей определена по диаметру расплыва конуса бетонной смеси по методике EN 12350.5-2000 [10]. Очищенный и увлажненный конус Абрамса в перевернутом виде устанавливается на гладкий лист и заполняется бетонной смесью, а затем поднимается вертикально вверх (рис. 1).

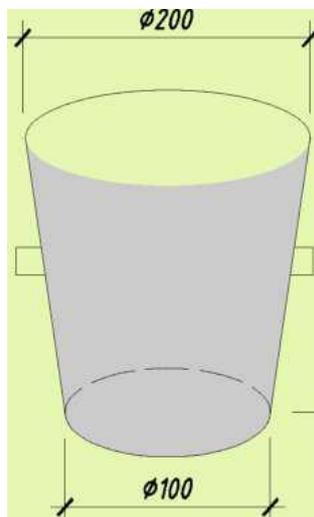


Рис. 1. Конус Абрамса для определения растекаемости смеси

Распływ конуса бетонной смеси определяется измерением диаметра расплывшейся лепешки (D_p) в двух взаимно перпендикулярных направлениях (рис. 2).

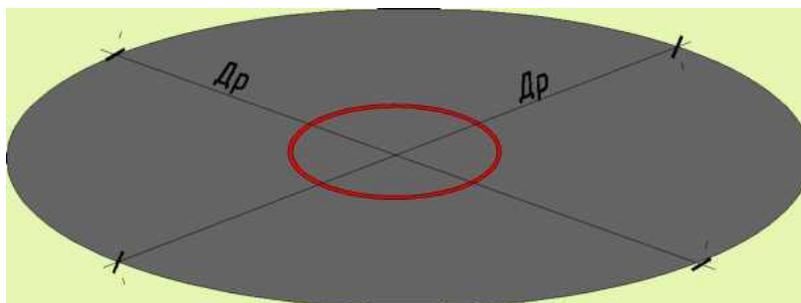


Рис. 2. Определение диаметра расплыва бетонной смеси

Реологическая характеристика бетонных смесей (условная вязкость T_{500}) установлена в процессе определения растекаемости как время достижения смесью диаметра 500 мм.

Выбор добавок для самоуплотняющихся бетонных смесей. При выборе химических добавок для самоуплотняющихся бетонных смесей главной задачей является определение совместимости добавок с цементом и между собой, если они используются в комплексе [11]. Обычно производители добавок гарантируют их высокую эффективность. Однако в производственных условиях обязательно следует учитывать, каким образом химические модификаторы влияют на свойства бетонных смесей и на физико-механические характеристики затвердевшего бетона.

В исследованиях дозировка добавок для СУБ принималась по рекомендациям производителей и результатам ранее выполненных работ [12].

Для определения эффективности и совместимости добавок марки *Sika* с портландцементом марки ПЦ500-Д0 были приготовлены составы, характеристики которых представлены в табл. 3 и 4.

Таблица 3

Показатели конструктивности СУБ с добавками марки *Sika*

Состав	Расход материала на 1 м ³ смеси, кг						Диаметр расплыва, см	Вязкость смеси T_{500} , с	В/Ц	Средняя плотность смеси, кг/м ³	Признаки расслоения
	Цемент ПЦ500-Д0	Вода	Песок кварцевый	Щебень фр. 5-10 мм	VC 24NE	S.4R					
1А	458	224	713	1018	6,8	—	64,0	6	0,49	2420	Есть
2А	442	269	687	982	6,6	2,24	63,0	7	0,61	2390	Нет
3А	455	220	708	1011	6,8	—	66,0	4	0,48	2400	Есть
4А	453	219	705	1008	6,8	2,3	43,0	—	0,48	2395	Нет
5А	458	215	712	1018	6,9	—	66,0	5	0,47	2410	Есть
6А	454	213	706	1008	6,8	2,3	42,0	—	0,47	2390	Нет

Таблица 4

Физико-механические характеристики СУБ с добавками марки *Sika*

Состав	Ц/В	П/Щ	Средняя плотность бетона, кг/м ³	Предел прочности при сжатии, МПа, в возрасте, сут.			Коэффициент использования цемента К _ц
				1	7	28	
1А	2,04	0,70	2330	25,7	50,2	54,6	8,39
2А	1,64	0,70	2315	8,4	36,3	47,2	9,36
3А	2,07	0,70	2375	25,9	60,1	68,0	6,69
4А	2,07	0,70	2370	22,95	52,9	56,6	8,00
5А	2,13	0,70	2385	28,9	68,2	79,2	5,78
6А	2,13	0,70	2375	26,5	66,4	75,5	6,01

В процессе приготовления смесей визуально оценивались признаки расслоения. Установлено, что для обеспечения высокой текучести смесей требуется повышенный расход воды, а это неизбежно приводит к водоотделению (составы 1А, 3А, 5А). Для устранения этого эффекта и повышения сегрегационной устойчивости смесей вместе с гиперпластификатором вводился стабилизатор. Добавка *S.4R* на основе крахмала обладает высокой водоудерживающей способностью и повышает стойкость бетонных смесей к расслоению, но увеличивает водопотребность смеси на 20 % при условии получения равноподвижных смесей (состав 2А). При одинаковом водоцементном отношении указанная добавка не обеспечивает требуемой растекаемости (составы 4А и 6А).

На рис. 3 представлен характер растекаемости смесей:

- способных к самоуплотнению (состав 2А),
- не обладающих признаками самоуплотнения (составы 4А и 6А).



а)



б)

Рис. 3. Характер распыла: самоуплотняющихся бетонных смесей (состав 2А) (а); смесей без признаков самоуплотнения (составы 4А и 6А) (б)

О водоредуцирующем эффекте химических модификаторов в бетоне можно судить по коэффициенту использования цемента $K_{ц}$ — удельному расходу цемента на единицу прочности бетона:

$$K_{ц} = Ц/R_{28}, \quad (1)$$

где Ц — расход цемента на 1 м³ бетона, кг; R_{28} — прочность бетона в проектном возрасте, МПа.

Для СУБ, приготовленных на цементе марки ПЦ500-Д0 с добавками марки *Sika*, оптимальным является бетон состава 5А. В этом случае при минимальном расходе цемента обеспечивается требуемая растекаемость смеси и максимальная прочность бетона.

Оценка совместимости добавок марки *MC Bauchemie* и сульфатостойкого цемента с минеральными добавками класса ЦЕМII-42,5Н-СС выполнена при исследовании составов, характеристики которых приведены в табл. 5 и 6.

Таблица 5

Показатели конструктивности СУБ с добавками марки *MC Bauchemie*

Состав	Расход материала на 1 м ³ смеси, кг						Диаметр распыла, см	Вязкость смеси T_{500} , с	В/Ц	Средняя плотность смеси, кг/м ³	Признаки расслоения
	Цемент ЦЕМII-42,5Н-СС	Вода	Песок кварцевый	Щебень фр. 5–10 мм	FK 63	S.M21					
1В	418	206	680	1099	6,3	—	58	9	0,49	2410	Нет
2В	413	214	723	1033	6,2	—	48	—	0,52	2390	Нет
3В	408	220	766	970	6,1	—	60	5	0,54	2370	Есть
4В	361	205	722	1084	5,4	1,8	57	4	0,57	2380	Нет
5В	348	234	746	995	5,2	1,8	54	—	0,67	2330	Нет
6В	344	247	787	935	5,1	1,75	60	4	0,72	2320	Нет

Таблица 6

Физико-механические характеристики СУБ с добавками марки *MC Bauchemie*

Состав	Ц/В	П/Щ	Средняя плотность бетона, кг/м ³	Предел прочности при сжатии, МПа, в возрасте, сут.		Коэффициент использования цемента $K_{ц}$
				1	28	
1В	2,03	0,62	2345	17,6	58,7	7,1
2В	1,93	0,70	2365	15,2	52,5	7,9
3В	1,85	0,79	2375	14,1	49,7	8,2
4В	1,76	0,67	2360	14,75	43,1	8,4
5В	1,49	0,75	2330	8,7	33,7	10,3
6В	1,39	0,84	2290	6,6	27,1	12,7

Анализ полученных результатов показывает, что высокой текучести смеси могут достигать за счет повышенного содержания мелкозернистых фракций заполнителя, увеличения расхода воды и дозировки гиперпластификатора. Введение стабилизатора *S.M21*, приготовленного на основе комплексной смеси микрозаполнителя и синтетических полимеров, устраняет водоотделение и снижает вязкость бетонных смесей. Однако при этом повышается водопотребность, что приводит к снижению прочности бетона. В бетоне 1В с наименьшей величиной коэффициента использования цемента $K_{ц}$ рационально соотносятся массы заполнителя и расход цемента и при этом достигаются требуемая растекаемость смеси и высокая прочность бетона.

Совместимость химических добавок марки *BASF* с бездобавочным цементом ПЦ500-Д0 определена при исследовании бетонных смесей, характеристики которых представлены в табл. 7 и 8.

Таблица 7

Показатели конструктивности СУБ с добавками марки *BASF*

Состав	Расход материала на 1 м ³ смеси, кг							Диаметр распыла, см	Вязкость смеси T_{500} , с	В/Ц	Средняя плотность смеси, кг/м ³	Признаки расслоения
	Цемент ПЦ500-Д0	Вода	Песок кварцевый	Щебень фр. 5–10 мм	MG115	MG430	MM100					
1С	505	224	707	960	10,1	—	—	55	8	0,44	2405	Есть
2С	489	260	685	929	9,8	—	2,4	55	6	0,53	2375	Нет
3С	513	224	718	975	—	10,3	—	58	7	0,44	2440	Есть
4С	484	257	677	920	—	9,71	2,4	64	3	0,53	2350	Нет
5С	449	221	698	998	—	8,98	—	55	10	0,49	2375	Есть
6С	442	249	687	981	—	8,83	2,24	55	6	0,56	2370	Нет

Физико-механические характеристики СУБ с добавками марки BASF

Состав	Ц/В	П/Щ	Средняя плотность бетона, кг/м ³	Предел прочности при сжатии, МПа, в возрасте, сут.			Коэффициент Исползования цемента К _ц
				1	7	28	
1С	2,25	0,74	2350	5,1	37,8	50,4	10,0
2С	1,88	0,74	2335	2,7	31,5	44,4	11,0
3С	2,29	0,74	2430	7,0	53,2	59,3	8,6
4С	1,88	0,74	2340	2,6	36,4	47,0	10,3
5С	2,03	0,70	2350	8,3	37,45	50,1	9,0
6С	1,78	0,70	2330	6,3	33,4	45,8	9,6

В ходе исследований установлено, что для устранения признаков расслоения и обеспечения высокой однородности смеси требуется использование стабилизатора. Добавка ММ100, являясь модификатором на основе водного раствора высокомолекулярного синтетического полимера, захватывает в свои ячейки большое количество молекул воды и приводит к стабилизации цементно-водной системы. При этом вязкость смесей уменьшается, а водоотделение полностью устраняется. Но в процессе получения равноподвижных смесей стабилизирующая добавка увеличивает водопотребность бетонных смесей на 13–16 % и приводит к снижению прочности бетона на 10–15 %.

По минимальной величине коэффициента использования цемента К_ц можно считать, что оптимальным является бетон состава 3С, обеспечивающий достаточную растекаемость смеси и максимальную прочность бетона.

Заключение. Выполненные исследования показали, что при выборе химических модификаторов для самоуплотняющихся бетонов необходимо проводить исследования по реологической совместимости гиперпластификаторов и стабилизаторов с конкретным цементом, так как разжижающая эффективность добавок весьма чувствительна к химико-минералогическому и вещественному составу вяжущих материалов.

Библиографический список

1. Мозгалев, К. М. Самоуплотняющиеся бетоны: возможности применения и свойства / К. М. Мозгалев, С. Г. Головнев // Академ. вестник УралНИИпроект РААСН. — 2011. — № 4. — С. 70–74.
2. Самоуплотняющиеся бетоны. Реальность и перспективы / С. Н. Ефимов [и др.] // Строительная орбита. — 2013. — № 11. — С. 76–77.
3. Okamura, H. Self-Compacting Concrete / H. Okamura, M. Ouchi // Advanced Concrete Technology. — 2003. — Vol. 1, № 1. — P. 5–15.
4. Модифицированные бетоны нового поколения в сооружениях ММДЦ «Москва-сити» / С. С. Каприелов [и др.] // Строительные материалы. — 2006. — № 10. — С. 13–17.
5. Модифицированные высокопрочные бетоны классов В80 и В90 в монолитных конструкциях. Часть II / С. С. Каприелов [и др.] // Строительные материалы. — 2008. — № 3. — С. 9–13.
6. Несветаев, Г. В. Технология самоуплотняющихся бетонов / Г. В. Несветаев // Строительные материалы. — 2008. — № 3. — С. 24–28.
7. Добавки для бетона. Промышленные полимерные полы. Sika [Электронный ресурс] / Di-Trade. — Режим доступа: <http://www.ditrade-ltd.ru/sika2.html> (дата обращения: 14.04.17).

8. Продукция MC-BAUCHEMIE [Электронный ресурс] /Эм-Си Баухеми. — Режим доступа: <http://www.mc-bauchemie.ru/products/overview> (дата обращения: 14.04.17).
9. BASF. Продукция [Электронный ресурс] / БАСФ Строительные системы. — Режим доступа: <https://www.master-builders-solutions.basf.ru/ru-cis> (дата обращения: 14.04.17).
10. EN 12350-5:2000. Испытание бетонной смеси. Часть 5: Испытание на распływ / British Standards Institution. — 2000. — 8 с.
11. Ущеров-Маршак, А. В. Совместимость — тема бетоноведения и ресурс технологии бетона / А. В. Ущеров-Маршак, М. Циак // Строительные материалы. — 2009. — № 10. — С. 12–15.
12. Несветаев, Г. В. Некоторые вопросы применения добавок для бетонов / Г. В. Несветаев // Бетон и железобетон. — 2011. — № 2. — С. 78–80.