

Особенности разработки легких самоуплотняющихся бетонов на пористых заполнителях

М.В. Бычков, С.А. Удодов

Понятие самоуплотняющегося бетона (далее СУБ) введено более 20 лет назад профессором Окамурой [1]. Особенность его в том, что бетонная смесь не требует принудительного уплотнения при укладке. Состав подобран таким образом, что смесь под воздействием собственной силы тяжести заполняет форму или опалубку, в том числе и при производстве густоармированных конструкций. Исторически СУБ получил развитие за рубежом (Япония, Европа, США), но в последние годы интерес к этой технологии значительно возрос и в России.

Распространению СУБ в нашей стране способствует всестороннее изучение предмета российскими учеными. Этой теме посвящены работы Несветаева Г.В., Калашникова В.И., Ваучского М.И., Головнева С.Г. и др.

Технология производства и применения СУБ требует качественно нового подхода к обеспечению стабильности свойств исходных материалов, режимов дозирования, смешивания компонентов и транспортировки смеси. Естественно, необходимо также повышать культуру производства строительных работ и налаживать систему контроля качества процессов на стройплощадке, которые сейчас в России все еще далеки от идеальных [2].

Тем не менее, на сегодняшний день имеется положительный опыт применения СУБ в России [3,4]. Отмечается, что, несмотря на более высокую стоимость по сравнению с равнопрочным обычным бетоном, применение СУБ оправдывает себя благодаря, в частности, снижению затрат на электроэнергию и людские ресурсы в процессе бетонирования.

Одним из перспективных и мало изученных направлений в технологии СУБ является разработка и применение легких (с величиной средней плотности менее 1800 кг/м^3) самоуплотняющихся бетонов (далее ЛСУБ) на пористых заполнителях. Преимущества такого материала очевидны: в нем сочетаются ско-

рость, простота и качество укладки смеси, свойственные СУБ, со сниженным весом конструкции и высоких прочностных свойствах, присущих легким конструкционным бетонам.

Для получения реологических свойств, соответствующих самоуплотняющейся бетонной смеси, при разработке ЛСУБ используются известные закономерности. Так, в частности, для получения максимального диаметра расплыва бетонной смеси на пористом заполнителе необходимо максимально снизить величину предельного напряжения сдвига τ бетонной смеси. На практике наиболее эффективным инструментом снижения предельного напряжения сдвига является применение суперпластификаторов на основе эфиров поликарбоксилатов. Данный класс пластификаторов, называемых иногда гиперпластификаторами, весьма разнообразен как по строению молекул, так и по действию, оказываемому на свойства бетонной смеси и бетона. Кроме того, в отличие от более простых пластификаторов, например, на основе лигносульфонатов пластифицирующая способность гиперпластификаторов сильно варьируется в сочетании с различными цементами [5,6]. Таким образом, из практических соображений, выбор гиперпластификатора следует проводить индивидуально для каждого вида цемента.

В нашей работе был изучен ряд суперпластификаторов на основе эфиров поликарбоксилатов. Были отобраны добавки, предлагаемые компанией ООО «СИНТЭК» (г. Краснодар), компаниями «Зика» (Швейцария) и «Эм Си Баухеми» (Германия). Эффективность пластифицирующей способности добавок оценивалась на трех различных видах цемента по значению предельного напряжения сдвига цементной суспензии τ_0 . Для этого с каждой добавкой последовательно приготавливалась цементно-водная суспензия с фиксированным значением В/Ц для каждого вида цемента, и определялся диаметр расплыва полученного теста с применением мини-вискозиметра Суттарда (методика [7]). Дозировка всех добавок принималась 0,6% по жидкому веществу от массы цемента. Величина предельного напряжения сдвига определялась по формуле (1):

$$\tau_0 = (\rho \cdot h \cdot d^2) / k \cdot D^2, \quad (1)$$

где ρ – плотность цементной суспензии, кг/м³;

h, d – соответственно высота и диаметр, м, мини-вискозиметра Суттарда;

D – диаметр расплыва, м, цементной суспензии; $k = 2$.

Результаты измерений диаметра расплыва цементной суспензии и соответствующие значения τ_0 приведены в таблице №1.

Таблица №1

Диаметр расплыва цементной суспензии, мм, при различных сочетаниях цемента и добавки и соответствующее значение (τ_0)

Суперпластификатор	Цемент		
	«Новоросцемент», М500 Д0, В/Ц=0,3	«Новоросцемент», М500 Д20 ССПЦ, В/Ц=0,33	СЕМ I-52,5 R, пр-во Турция, В/Ц=0,33
Синтепол 401 (ООО «Синтэк»)	255 (3,48)	195 (6,24)	195 (6,30)
Синтепол 430 (ООО «Синтэк»)	233 (4,17)	173 (7,92)	130 (14,16)
Sika Viscocrete 32SCC (Sika)	260 (3,35)	260 (3,51)	240 (4,16)
Sika Viscocrete 5-600 NPL (Sika)	238 (4,17)	213 (5,23)	150 (10,64)
МС1190 (МС Bauchemie)	280 (2,89)	233 (4,37)	280 (3,05)
МС 3100 (МС Bauchemie)	273 (3,11)	260 (3,51)	270 (3,28)

Из данных таблицы №1 следует, что представленные добавки в целом наиболее эффективно сработали на цементе ПЦ М500 Д0 ОАО «Новоросцемент». Объясняется это отсутствием значительного количества минеральных добавок в цементном вяжущем. При этом наименьшее значение предельного напряжения сдвига обеспечивают добавки Sika Viscocrete 32SCC, МС 1190 и МС 3100. Причем последние две проявили наиболее сильную пластификацию. Однако, при выборе оптимального пластификатора следует учитывать не только его пластифицирующую способность, но и влияние его на вязкость смеси.

Вязкость самоуплотняющейся бетонной смеси – это важная реологическая характеристика. Этот параметр отдельно регламентируется европейскими нормами. Например, в документе [8] вязкость смеси характеризуется временем достижения смесью диаметра расплыва 500 мм, а в нормах EN 12350-9:2010 вязкость определяется временем полного истечения смеси из специальной V-

образной воронки. Уровень вязкости влияет не только на время растекания смеси, но и на ее реологическую стабильность, т.е. способность не расслаиваться в процессе транспортировки и укладки. Причем чем больший диаметр расплыва требуется получить, тем большей вязкостью должна обладать смесь. В работах [9,10] показано, что больший диаметр расплыва смесь имеет при меньшем значении предельного напряжения сдвига. Снижать это значение можно не только рациональным выбором сочетания «цемент-добавка», но и повышая дозировку выбранной добавки. Однако, одновременно, для обеспечения нераслаиваемости смеси, следует повышать ее вязкость. Это достигается дополнительным применением минеральных или химических добавок-стабилизаторов. В последнее время акцент делается на химических стабилизаторах, как более эффективных. Кроме того, их можно вводить дополнительным компонентом в суперпластификаторы, что облегчает задачу дозирования. Исходя из приведенных данных, для дальнейших исследований была выбрана добавка Sika Viscocrete 32SCC, которая в своем составе уже содержит стабилизатор.

Для получения тяжелого СУБ выбор пластификатора, его вида и дозировки, обеспечивающего оптимальное соотношение величины предельного напряжения сдвига и параметров вязкости, наряду с рационально подобранной гранулометрической кривой минеральных составляющих являются определяющими в деле обеспечения реологической стабильности смеси. При разработке же состава ЛСУБ особую важность приобретает еще один фактор, не учитываемый в тяжелых бетонах.

Как известно, СУБ содержат повышенное количество растворной части. Это необходимое условие для получения требуемой консистенции. В работе [11] оценка растворной части по отношению к крупному заполнителю в бетонах проводится по критерию избытка $I_{цдп}^{III}$ абсолютного объема цементно-дисперсно-песчаной реологической матрицы над абсолютным объемом щебня. Показано, что если для обычного бетона $I_{цдп}^{III}=1,1-1,5$, то для СУБ он должен быть не менее $I_{цдп}^{III}=1,8-2$. Таким образом, крупный заполнитель в СУБ «пла-

вает» в избытке растворной части. При этом, если в тяжелых СУБ разница между средней плотностью растворной части и зерен крупного заполнителя не превышает 10-15%, то в случае применения легких пористых заполнителей эта разница может составлять 50% и более. Плотность пористого заполнителя «в деле», т.е. фактическая плотность зерен заполнителя с учетом насыщения водой и растворной частью, заметно отличается от средней плотности окружающей растворной части. Как следствие, смесь склонна к расслоению из-за всплытия крупного заполнителя.

Исходя из вышесказанного, представляет интерес количественная оценка влияния разности плотностей растворной части и заполнителя на склонность самоуплотняющейся бетонной смеси к расслаиванию.

В рамках решения этой задачи важно объективно оценить среднюю плотность зерен крупного заполнителя, находящегося в растворной части, т.е. можно говорить о средней плотности зерен «в деле» $\rho_{з.д.}$. За основу взята методика определения средней плотности зерен заполнителя в цементном тесте по ГОСТ 9758-86 «Заполнители пористые неорганические для строительных работ. Методы испытаний» с некоторой корректировкой. Стандартная методика предусматривает получение жесткой бетонной смеси с жесткостью 5-10 секунд, затем выдержка в течение 15 минут и дополнительное уплотнение на виброплощадке в течение 30-60 секунд. В нашем случае на различных заполнителях изготавливалась самоуплотняющаяся бетонная смесь с распылом конуса 75-80 см, которая выдерживалась в течение 15 минут без последующего принудительного уплотнения. Стоит отметить, что если предположение об отрицательном влиянии увеличения разности плотностей на реологическую стабильность самоуплотняющейся бетонной смеси верно, то оно должно быть справедливо не только для случая, когда заполнитель легче растворной части, но и тогда, когда заполнитель плотнее. Исходя из этого были рассмотрены два вида крупного пористого заполнителя (керамзит цельный и щебень из вулканического туфа) и два вида плотного заполнителя (щебень из гравия осадочного происхождения и

щебень из магматических горных пород). Крупность зерен заполнителя всех видов составляла от 5 до 10 мм. Состав растворной части, в которой затем определялся параметр $\rho_{з.д.}$ для каждого из заполнителей, приведен в таблице №2.

Таблица №2

Состав растворной части

Компонент	Массовая доля
Цемент «Новоросцемент», М500 Д0	0,23
Микрокремнезем	0,02
Песок из вулканического туфа, фракция 0-5 мм	0,52
Суперпластификатор Sika Viscocrete 32SCC (жидкая)	0,004
Вода	0,22

Средняя плотность растворной части составила $\rho_{р-ра}=1745$ кг/м³. В таблице №3 приведены значения средней плотности зерен различных видов в сухом состоянии и «в деле».

Таблица №3

Показатели средней плотности зерен фр. 5-10 мм применяемых заполнителей

Вид заполнителя	Керамзит цельный	Вулканический туф	Щебень из гра-вия осадочного происхождения	Щебень плотный из магматических пород
Средняя плотность зерна фр. 5-10 мм, кг/м ³ , в сухом состоянии	1010	1560	2420	2860
Средняя плотность зерна фр. 5-10 мм, кг/м ³ , в деле	1069	1670	2425	2866
Параметр $K\rho$	0,61	0,98	1,39	1,64

Для количественной оценки разности средней плотности зерна $\rho_{з.д.}$ и плотности растворной части оценивалась по условному показателю $K\rho$:

$$K\rho = \rho_{з.д.} / \rho_{р-ра},$$

где $\rho_{з.д.}$ – средняя плотность зерна в деле, кг/м³;

ρ_{p-pa} – средняя плотность растворной части, кг/м³.

Полученные значения показателя $K\rho$ также приведены в таблице №3. Согласно сделанному ранее предположению, самоуплотняющаяся бетонная смесь, при прочих равных условиях, должна быть тем более стойкой к расслоению, чем ближе значение $K\rho$ к единице.

Самоуплотняющиеся бетоны при укладке не подвергаются виброуплотнению. Напротив, приложение вибрации к готовой смеси способно привести к достаточно быстрому расслоению. В нашей работе для оценки склонности смесей на различных заполнителях к расслоению смеси подвергались принудительному виброуплотнению на виброплощадке в течение 10 секунд. Смесь расслаивалась, при этом в легких смесях пористый заполнитель всплывал, в тяжелых – оседал на дно. Затем для каждой смеси определялся параметр расслоения Pr . Методика аналогична определению показателя раствороотделения по ГОСТ 10181-2000 с той разницей, что определялась разность содержания не растворной части в верхней и нижней зонах сосуда, а разность (по модулю) содержания заполнителя фракции 5-10 мм. Результаты измерений приведены в таблице №4.

Таблица № 4

Значения параметра $K\rho$ и соответствующие значения показателя расслаиваемости Pr самоуплотняющейся бетонной смеси

Вид заполнителя	Керамзит цельный	Вулканический туф	Щебень из гравия	Щебень плотный
Параметр $K\rho$	0,61	0,98	1,39	1,64
Показатель расслаиваемости Pr , %	38	1	39	52

Полученные данные подтверждают, что смеси, в которых средняя плотность заполнителя $\rho_{з.д}$ отлична от плотности растворной части, склонны к расслоению. И чем сильнее значение параметра $K\rho$ отклоняется от 1, тем быстрее расслаивается смесь.

Зависимость показателя расслаиваемости Pr от параметра $K\rho$ приведена на рис. 1.

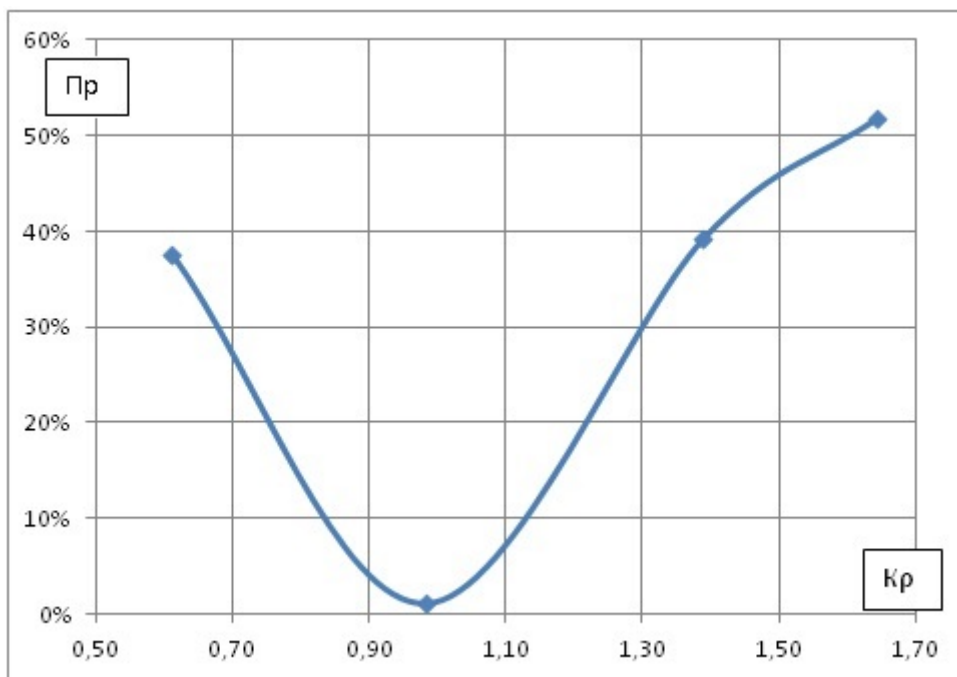


Рис. 1. - Зависимость показателя расслаиваемости Pr от параметра $K\rho$.

Полученные данные доказывают необходимость особого подхода к выбору пористого заполнителя при разработке составов легких самоуплотняющихся бетонов. Показано, что разность плотностей зерен заполнителя и окружающей его растворной части напрямую влияет на стабильность бетонной смеси. Причем это утверждение справедливо как для пористых заполнителей, средняя плотность зерен в деле которых ниже плотности растворной части, так и для тяжелых заполнителей, превышающих по плотности раствор. Критерием для отбора оптимального с точки зрения равенства плотностей заполнителя для ЛСУБ может стать предложенный в работе параметр $K\rho$. В нашей работе оптимальным заполнителем, дающим наиболее стабильную смесь, явился вулканический туф Каменского месторождения республики Кабардино-Балкарии. Свойства породы применяемого вулканического туфа приведены в таблице №5.

Таблица №5

Свойства породы вулканического туфа

Показатель	Значение
Истинная плотность, кг/м ³	2340
Средняя плотность, кг/м ³	1650
Пористость, %	30
Водопоглощение по массе, %	16
Коэффициент размягчения	0,72

Базовый состав ЛСУБ с применением данного заполнителя и его основные физико-механические свойства приведены в таблицах соответственно, №6 и №7.

Таблица №6

Базовый состав ЛСУБ с применением пористого заполнителя из вулканического туфа

Материал	Расход на 1м ³ смеси, кг
Цемент «Новоросцемент», М500 Д0	400
Микрокремнезем	40
Песок из вулканического туфа, фракция 0-5 мм	910
Щебень из вулканического туфа, фракция 5-10 мм	214
Вода	360
Суперпластификатор Sika Viscocrete 32SCC (жидкая)	8

Таблица №7

Основные физико-механические свойства смеси и затвердевшего ЛСУБ (в возрасте 28 сут.)

Характеристика	Значение
Диаметр расплыва смеси, см	87
Средняя плотность смеси, кг/м ³	1930
Средняя плотность бетона в сух. состоянии, кг/м ³	1781
Средняя прочность при сжатии, МПа	41,83
Средняя прочность при изгибе, МПа	4,95
Средняя призмная прочность, МПа	34,67
Модуль упругости бетона, МПа	17300

Литература

1. Okamura Hajime, Ouchi Masahiro Self-Compacting Concrete [Текст] // Journal of Advanced Concrete Technology, - vol. 1(2003), №1, P. 5-15.
2. Виноградова Е.В. Проблемы управления качеством бетонных работ [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2012, №3. - Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/1001> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.
3. Каприелов С.С., Травуш В.И., Карпенко Н.И., Шейнфельд А.В., Кардунян Г.С., Киселева Ю.А., Пригоженко О.В. Модифицированные бетоны нового поколения в сооружениях ММДЦ «Москва-Сити» [Текст], часть I, Строительные материалы, - №10, 2006 г. С. 13-17.
4. Рыжов И.Н. О влиянии свойств бетона на качество и себестоимость строительного объекта [Текст] // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века, №8, 2007 г. С.35.
5. Несветаев Г.В., Та Ван Фан Влияние белой сажи и метакаолина на прочность и деформационные свойства цементного камня [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2012, №4 (ч.1) - Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1110> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.
6. Несветаев Г.В., Давидюк А.Н., Хетагуров Б.А. Самоуплотняющиеся бетоны: некоторые факторы, определяющие текучесть смеси [Текст] // Строительные материалы, - №3, 2009 г. С. 54-57.
7. Несветаев Г.В. Технология самоуплотняющихся бетонов [Текст] // Строительные материалы, - №3, 2008 г. С.24-27.
8. The European guidelines for self-compacting concrete: specification, production and use. UK [Текст], 2005. 68 P.

9. Мозгалева К.М., Головнев С.Г. Самоуплотняющиеся бетоны: возможности применения и свойства [Текст] // Академический вестник УралНИИПроект РААСН, - №4, 2011. С. 70-47.

10. Войлоков И.А. Самоуплотняющиеся бетоны. Новый этап развития бетоноведения [Текст] // Экспозиция, - №65, 2008 г. С. 5-8.

11. Калашников В.И. Расчет составов высокопрочных самоуплотняющихся бетонов [Текст] // Строительные материалы, - №10, 2008 г. С. 4-6.