



НЕСВЕТАЕВ Григорий Васильевич, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАЕ, заведующий кафедрой технологии строительного производства Ростовского государственного строительного университета.

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ПРИМЕНЕНИЯ ДОБАВОК ДЛЯ БЕТОНОВ

Несветаев Г. В.,
д-р техн. наук, проф., РГСУ

Развитие технологии бетона сегодня [1] неразрывно связано с применением различных добавок, позволяющих существенно менять свойства и бетонной смеси, и затвердевшего бетона. Одна из ведущих ролей принадлежит добавкам, позволяющим в значительной степени изменять водосодержание бетонной смеси без изменения ее подвижности (водопонижители) или увеличивать подвижность смеси без изменения ее водосодержания (разжижители). ГОСТ 24211 определяет такие добавки как «Регулирующие свойства готовых к употреблению бетонных смесей». Сегодня количество представленных на рынке таких добавок огромно, что часто ставит потребителей перед нелегкой проблемой выбора. В зависимости от эффективности добавок, т. е. способности разжижать бетонные смеси до высокой подвижности (или понижать водопотребность бетонной смеси при сохране-

нии подвижности неизменной) ГОСТ 24211 объединяет их в три большие группы:

- пластифицирующие (увеличение подвижности от П1 до П3, ВД < 12%);
- сильнопластифицирующие (от П1 до П4, ВД < 20%);
- суперпластифицирующие СП (от П1 до П5, ВД > 20%).

Водоредуцирующая (водопонижающая ВД) и разжижающая (ОК) способность добавок согласно [2] связаны соотношением

$$V_d = 3 \left(\frac{OK}{2,5} - 1 \right) \quad (1)$$

В последние годы все шире применяются добавки нового поколения — высокоэффективные разжижители на основе эфиров поликарбоксилатов — гиперпластификаторы ГП (ВД > 30%), позволяющие получать в т. ч. бетонные смеси нового поколения — самоуплотняющиеся (предложены проф. Окамурой (Okamura Н.) в 1986 г.). Дозировка ГП составляет обычно 0,1–0,3% массы цемента, что существенно ниже в сравнении с СП (0,4–0,8%). Нормы [3] предусматривают 3 класса текучести самоуплотняющихся бетонных смесей (табл. 1).

Подвижность (осадка конуса бетонной смеси — ОК), в т. ч. текучесть (расплав конуса бетонной смеси — D) определяются при прочих равных условиях величиной предельного напряжения сдвига цементного теста τ_0 [2]. Необходимо иметь в виду, что разжижающая способность (и водоредуцирующий эффект) добавки весьма чувствительны к особенностям химико-минералогического и вещественного состава цемента, и в настоящее время совместимость добавки с конкретным цементом может быть определена только экспериментально. Методика измерений проста [5] и позволяет за короткое время получить зависимость предельного напряжения сдвига цементного теста от вида и дозировки добавки для конкретного цемента (рис. 1). Для получения самоуплотняющихся смесей класса SF 1 значение τ_0 ориентировочно должно составлять не более 10, а SF 2 — 8.

Как известно, добавки СП и ГП позволяют:

- получать высокоподвижные бетонные смеси (П4, П5) при неизменных водосодержании смеси и соотношении вода/цемент (В/Ц) в сравнении с эталонным составом;
- получать высокопрочные бетоны за счет снижения водосодержания бетонной смеси при неизменном расходе цемента (снижение В/Ц на 20–30% обеспечивает повышение прочности бетона на 30–60% при одинаковой с эталоном подвижности бетонной смеси);
- снижать расход цемента за счет снижения водосодержания бетонной смеси, при этом прочность бетона обеспечивается равной прочностью эталонного состава.

Применение добавок в 1 и 2-м случаях предопределяет повышение себестоимости бетонной смеси, при этом эко-

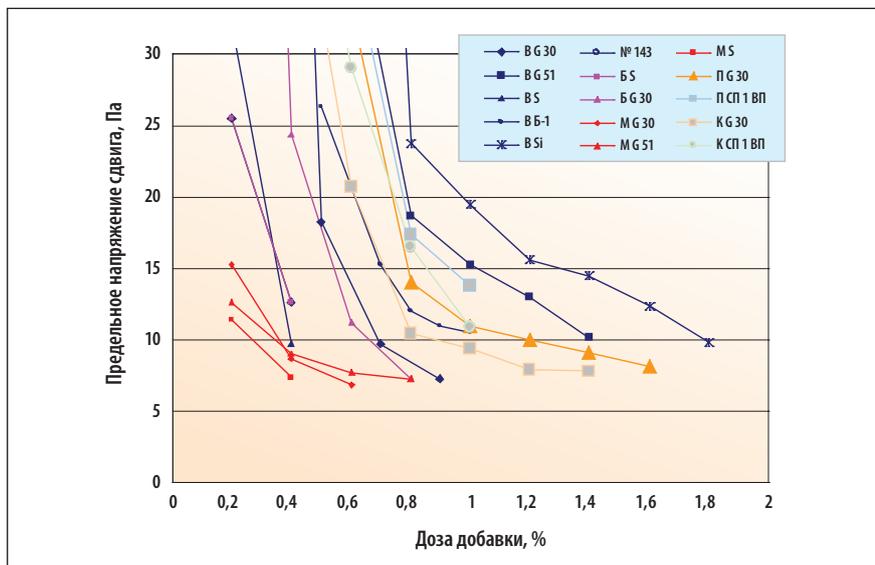


Рис. 1. Влияние вида и дозы СП, вида цемента на предельное напряжение сдвига цементного теста. В, М, Б, П, К — соответственно цементы Вольский, Мальцовский, Белгородский, «Пролетарий», «Кавказцемент»; Б, С, Г 30, Г 51 — соответственно СП Бинум — 1, Structuro 530, Glenium 30, Glenium 51

Таблица 1. Характеристика и области применения SCC

Марка по подвижности	Диаметр расплыва, (О.К.*; мм; ВД по ф. (1), %	Область применения
SF 1	550 – 650 (> 265; > 29%)	Неармированные или малоармированные бетонные конструкции – плиты перекрытий, трубопроводы, облицовки туннелей, фундаменты
SF 2	660 – 750 (> 275; > 30%)	Большинство обычных сооружений – колонны, стены
SF 3	760 – 850 (> 285; > 31%)	Вертикальные элементы, густоармированные конструкции сложных форм, торкретирование

* - ориентировочно [4]

Таблица 2. Эффективность применения высокопрочных бетонов в колоннах

Параметры колонны под нагрузку 850 т, высота 4,2 м			
Класс бетона	Сечение колонны	Коэффициент армирования (рабочая арматура)	Стоимость относительная
В 40	600 × 600 мм	0,016	1
В 80	500 × 500 мм	0,003	0.63
В 100	400 × 400 мм	0,003	0.595

номический эффект может быть обеспечен за счет снижения затрат на укладку и уплотнение бетонной смеси, отделку поверхности после распалубки (высокоподвижные смеси), снижения расхода арматурной стали и уменьшения сечения элементов (высокопрочные бетоны — табл. 2).

Экономический эффект при применении добавок за счет сокращения расхода цемента будет обеспечен при выполнении условия

$$\Delta C_{ц} \cdot C_{ц} > D \cdot C_{д} = d \cdot C_{ц} \cdot C_{д}, \quad (2)$$

или с учетом $\Delta C_{ц} = kC_{ц}$,

$$\frac{C_{д}}{C_{ц}} < \frac{k}{0,01 \cdot d}, \quad (3)$$

где $C_{д}$, $C_{ц}$ — стоимость добавки (включая затраты на ее применение в технологии) и цемента, руб./т; d — доза добавки, % от массы цемента; k — доля снижения расхода цемента (0,05–0,3).

Рис. 2 иллюстрирует вышеизложенное. Для СП в качестве «пределной цены» можно ориентировочно рассматривать соотношение $C_{д}/C_{ц} = 25–30$, для ГП от 35 до 150. Поскольку предел прочности бетона с добавками может быть определен как [6]

$$R = k_{SP} \left(\frac{aR_{ц}}{\left(\frac{B}{C_{ц}} \right)^{1,39}} \right), \quad (4)$$

где k_{SP} — коэффициент, учитывающий влияние добавки на формирование прочности бетона, то в случае

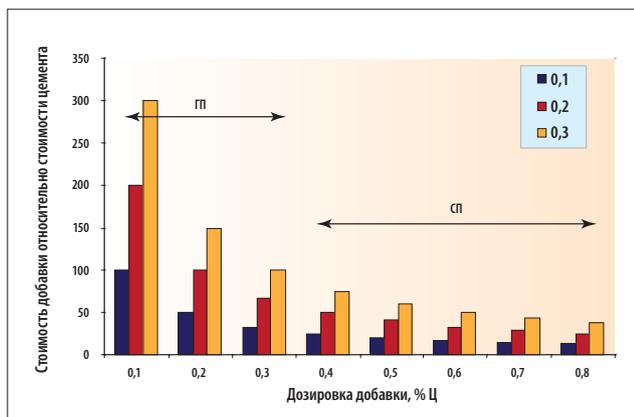


Рис. 2. Допускаемое соотношение стоимости добавки и цемента в зависимости от дозировки добавки и изменения расхода цемента, при котором обеспечивается «нулевой» экономический эффект. 0,1 ... 0,3 — снижение расхода цемента от первоначального (10 – 30%)

введения в состав бетонной смеси добавки при сохранении подвижности бетонной смеси и прочности бетона относительно бездобавочного эталона неизменными возможное снижение расхода цемента будет определяться водоредуцирующей способностью добавки и величиной k_{SP} (табл. 4).

Как видно из табл. 4, снижение расхода цемента может составлять от 3 до 32%. При начальном содержании цемента 440 кг/м³ это составит от 13 до 140 кг/м³, или примерно от 4 до 470 руб/м³. Величина k_{SP} является очень важной характеристикой добавки, поскольку влияет на величину изменения расхода цемента в составе бетонной смеси для достижения требуемой прочности (рис. 3), при этом производителем, а тем более поставщиком добавок величина k_{SP} не указывается, поскольку, во-первых, она не является «гостированным» показателем. ГОСТ определяет допускаемое снижение прочности при применении добавок не более 5% во все сроки твердения (в некоторых зарубежных нормах установлен предел 10%). Во-вторых, поскольку величина k_{SP} зависит от особенностей состава цемента и, следовательно, для одной и той же добавки может иметь разное значение в зависимости от свойств цемента, производитель добавки, часто не имеющий возможности тестировать ее с тем цементом, который использует потребитель, естественно, не имеет возможности привести значение k_{SP} в паспорте добавки.

К сожалению, приходится констатировать, что не всегда поставщики добавок готовы быть до конца «честными» с потенциальными потребителями. Самый, пожалуй, наглядный пример сегодня — противоморозные добавки. Во-первых, дозировка противоморозных добавок назначается в % от массы воды затворения, поскольку именно концентрация добавки определяет температуру замерзания воды в составе бетонной смеси и, следовательно, область применения добавки. Сегодня практически во всех каталогах дозировка противоморозной добавки указывается в % от массы цемента. Во-вторых, сегодня под противоморозными часто предлагаются добавки, позволяющие предохранить бетонную смесь от замерзания только в течение нескольких часов — для доставки и укладки, далее предполагается обеспечение благоприятных температурных условий для твердения, например, обогревными методами, хотя ГОСТ 24211 трактует противоморозные добавки как «обеспечение твердения при отрицательных

Таблица 4 Ориентировочное снижение расхода цемента, %, в зависимости от водоредуцирующей способности добавки и величины k_{SP} (равноподвижная смесь, равнопрочный бетон)

Значение k_{SP}	Водоредуцирующая способность добавки, % V_0					
	10	15	20	25	30	35
0,8	-	-	6	12	18	23
0,85	-	5	10	16	21	27
0,9	3	8	14	19	25	30
0,95	7	12	17	22	27	32

температурах». Только в качестве критерия указывается только «набор прочности при отрицательной температуре в возрасте 28 сут. не менее 30% контрольного состава нормального твердения». Ограничение возможности негативного влияния добавки на формирование прочности не оговаривается. Несовершенство нормативной базы позволяет предлагать под видом противоморозных добавок нечто иное.

Новернемся к суперпластификаторам. Как видно из рис. 3, в зависимости от степени влияния добавки на формирование прочности цементного камня (бетона) разница в возможном снижении расхода цемента может достигать 80 кг/м³ (!).

Поскольку добавки оказывают влияние на процесс гидратации, и, следовательно, на пористость цементного камня (табл. 5), а все свойства цементного камня (и бетона) определяются его пористостью, естественно, добавки могут оказывать влияние на все свойства бетона.

Как уже отмечалось, добавки могут негативно влиять на формирование прочности бетона, причем степень этого влияния часто превышает оговоренные стандартом значения (снижение прочности не более чем на 5%). Влияние добавки на изменение пористости цементного камня объясняет отмечаемый в практике разброс прочности бетона при равном значении $B/C_{ц}$ (рис. 4).

Поскольку модуль упругости цементного камня зависит от его пористости

$$E_p = E_0(1 - p)^x, \quad (7.17)$$

где p — пористость, а величина x по некоторым данным может составлять до 4, то влияние добавки на пористость цементного камня может снижать его модуль упругости. При изменении пористости по данным табл. 5 снижение модуля упругости цементного камня может со-

Таблица 3 Увеличение стоимости бетонной смеси, % от стоимости цемента

Цемент	Супер (гипер) пластификаторы					
	С-3 (СП-1)	Melment F 10	Structuro 530	Glenium 30	Glenium 51	Бином - 1
«Пролетарий»	$\frac{3,3^1}{2,6^2}$	$\frac{10,4}{8,5}$	$\frac{6,6}{5,4}$			
Белгородский			$\frac{4,9}{4,0}$	$\frac{8,7}{7,1}$		
Вольский			$\frac{7,65}{6,3}$	$\frac{10,4}{8,5}$	$\frac{16,0}{13,0}$	$\frac{2,8}{2,3}$
Мальцовский			$\frac{4,7}{3,8}$	$\frac{6,35}{5,2}$	$\frac{10,1}{8,3}$	$\frac{2,6}{2,1}$
Себряковский			$\frac{4,5}{3,7}$	$\frac{7,3}{5,9}$	$\frac{10,6}{8,7}$	$\frac{3,1}{2,5}$

Примечание: 1 — расход цемента 360 кг/м³; 2 — 440 кг/м³

ставить от 18 до 37%, что приведет к снижению модуля упругости бетона [6] примерно на 10–20%. Еще большее влияние добавки могут оказывать на ползучесть цементного камня. Согласно [7], в некоторых случаях при использовании добавок отмечается возрастание ползучести цементного камня в несколько раз. Увеличение усадки цементного камня при применении добавок может составлять 20–120%, в некоторых случаях до 200% [8].

Таким образом, применение добавок-пластификаторов не только изменяет свойства бетонной смеси, но может оказать значительное влияние на свойства бетона. Изменение показателей свойств в худшую сторону не означает катастрофу — если враг известен, с ним легче справиться, а положительный эффект от применения добавок перекрывает некоторые негативные моменты. Появление и широкое применение в технологии бетона высокоэффективных добавок обеспечило качественное изменение самой технологии и производительности труда. К сожалению, за этим стремительным процессом не успевает нормативная база (например, СП однозначно определяет величину модуля упругости бетона только в зависимости от его класса по прочности на сжатие). Координированные исследования по классификации многочисленных добавок по степени их эффективности с различными цементами не проводятся, в итоге страдают и производители, часто сталкивающиеся с недоверием со стороны потребителей к их продукции, и потребители добавок, поскольку вследствие естественного нежелания рисковать зачастую лишают себя возможности существенно повлиять на качество и себестоимость своей продукции. Понятно, что любые исследования требуют затрат. Сегодня крупные производители, например, «Полипласт», решают проблему самостоятельно. Возможно, и координацию, и частичное финансирование (вторая часть — от производителей добавок) мог бы взять на себя союз производителей бетона. Необходимо также совершенствование нормативной базы. Самоуплотняющиеся бетоны в России применяются уже не один год, но в наших нормах вообще нет такого понятия. Понятно, что разработка норм требует опять же серьезных исследований и затрат. В связи с этим можно рассматривать как альтернативу принятие так называемых «Евроном» (EN).

Литература

- Ушеров-Маршак А. В. Современный бетон и его технологии. — Бетон и железобетон (Оборудование, материалы, технологии), 2010., СПб: Славутич — С. 30–35.
- Баженов Ю. М., Демьянова В. С., Калашников В. И. Модифицированные высококачественные бетоны. — М.: АСВ, 2006. — 368 с.
- Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete. Farnham, February 2002
- Несветаев Г. В. Технология самоуплотняющихся бетонов // Строительные материалы. — 2008. — № 3. — С. 24–28. СПб: Славутич
- Давидюк А. Н., Несветаев Г. В., Хетагуров Б. А. Самоуплотняющиеся бетоны: некоторые факторы, определяющие текучесть смеси // Строительные материалы. — 2009. — № 3. СПб: Славутич
- Несветаев Г. В. Бетоны: учебно-справочное пособие. Ростов-на-Дону: Феникс, 2011. — 381 с.
- Несветаев Г. В., Давидюк А. Н. Самоуплотняющиеся бетоны: модуль упругости и мера ползучести // Строительные материалы. — 2009. — № 6. СПб: Славутич
- Несветаев Г. В., Давидюк А. Н. Самоуплотняющиеся бетоны: усадка // Строительные материалы. — 2009. — № 8 — С. 52–53. СПб: Славутич

Таблица 5 Полная пористость и расчетная степень гидратации цемента в присутствии ГП

Суперпластификатор	Полная пористость цементного камня, % (расчетная степень гидратации цемента)			
	М*	В*	С*	Б*
Нет	26,3 (0,55)	23,4 (0,61)	29,87 (0,48)	26,83 (0,545)
Glenium 51	26,6 (0,545)	23,1 (0,62)	29,97 (0,48)	-
Glenium 30	24,9 (0,58)	23,8 (0,605)	30,3 (0,47)	28,4 (0,51)
Structuro 530	27,0 (0,535)	22,48 (0,63)	31,2 (0,455)	32,4 (0,43)
Melflux 2641	21,55 (0,65)	22,51 (0,63)	-	-
Melflux 2651	25,22 (0,57)	22,69 (0,63)	-	-
Melflux 5581	25,24 (0,57)	21,05 (0,66)	-	-
Бином - 1	29,1 (0,495)	26,5 (0,55)	33,9 (0,405)	-

Примечание: М, В, С, Б – соответственно Мальцовский, Вольский, Себряковский, Белгородский цемента.

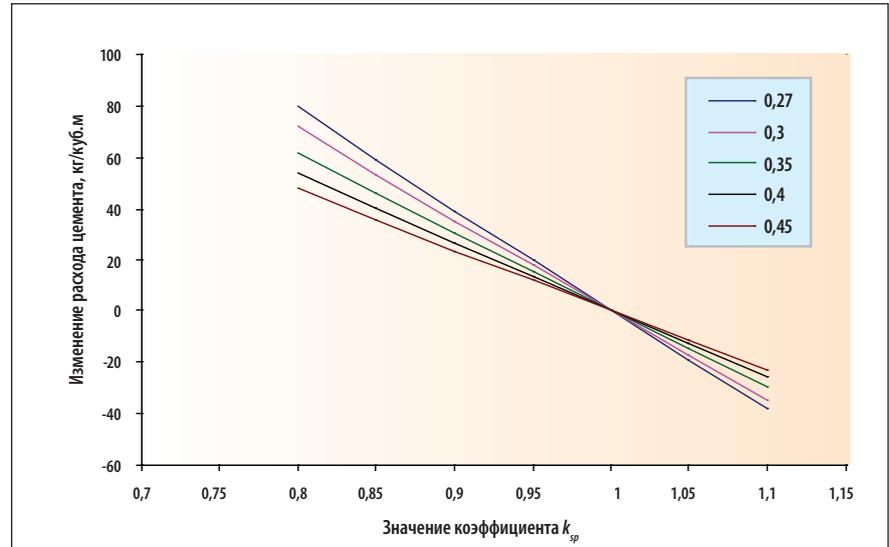


Рис. 3. Изменение расхода цемента для получения требуемой прочности бетона в зависимости от отношения В/Ц и значения k_{sp} добавки

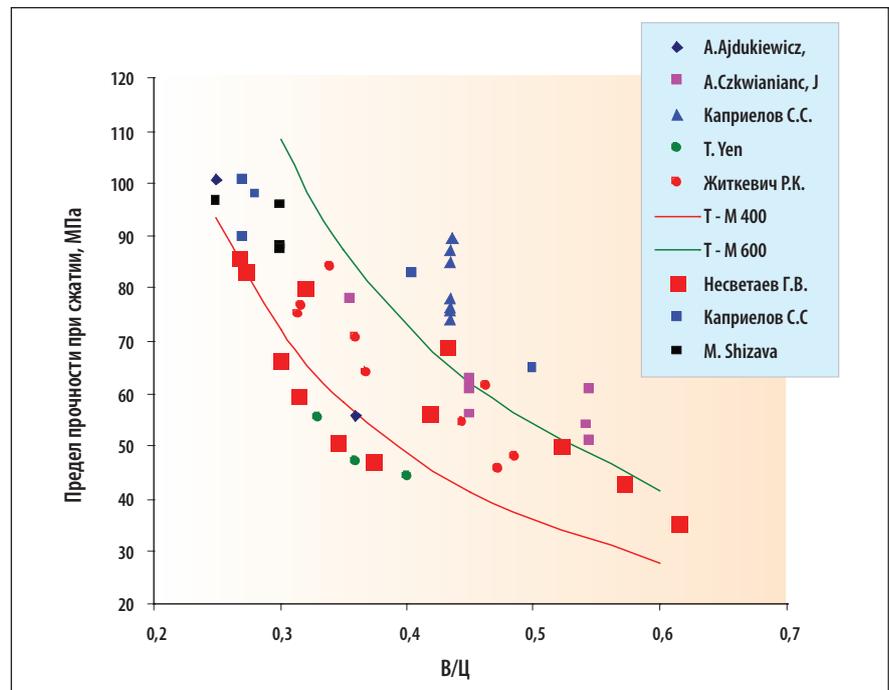


Рис. 4. Зависимость предела прочности SCC от величины В/Ц по некоторым данным; Т – М 400; Т – М 600 – по

$$\text{формуле } R_B = \frac{0,36R_{Ц}}{\left(\frac{B}{Ц}\right)^{1,3885}} \text{ при } R_{Ц} = 41 \text{ МПа и } 60,2 \text{ МПа соответственно}$$