

# Строительные материалы и изделия

УДК 666.972

## ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВОВ ТЯЖЕЛЫХ БЕТОНОВ ПРИМЕНЕНИЕМ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ДОБАВОК

*С.П. Горбунов*

## OPTIMIZATION OF THE STRUCTURE OF THE CONCRETE OF A HIGH SPECIFIC WEIGHT USING FINE-GRAINED ADMIXTURE

*S.P. Gorbunov*

Представлены результаты экспериментальных исследований тяжелых бетонов, образование которых происходило при непосредственном участии таких структурообразующих элементов, как тонкодисперсный компонент и эффективный пластификатор. Установлено, что при использовании тонкодисперсных добавок наблюдаются отклонения от известных закономерностей взаимосвязи «состав – свойство» цементных композиционных материалов.

*Ключевые слова:* зола-унос, микронаполнитель, структура бетона, прочность, водопоглощение, морозостойкость.

The results of experimental research for concrete of high specific weight, the production of which has taken place under such structure-forming elements as fine-grained admixture and an effective plasticizer, are given. It is stated that while using fine-grained admixture deviations from the known patterns of relations “structure-quality” of concrete reinforced compositions are seen.

*Keywords:* boiler fly ash, microcompound, the structure of concrete, strength, absorption of water, freeze-thaw resistance.

Интенсификация производства сборного бетона и железобетона при сохранении и улучшении проектных свойств композита в изделиях и конструкциях связана с использованием минеральных добавок в чистом виде или в комплексе с химическими. Применение тонкодисперсных добавок, например золы-уноса ТЭС, должно являться сегодня непременным атрибутом современной технологии изготовления высококачественного бетона. Зола-унос, благодаря своим специфическим качествам, способствует улучшению характеристик как бетонной смеси, так и бетона и позволяет организовать производство бетона повышенной рентабельности.

В композиционных строительных материалах зернистый компонент различных фракций, как правило, содержится в количестве 40–80 % и используется для модификации или усиления отдельных свойств композита и снижения расхода вяжущего. При оптимальном подборе зернового состава он может быть использован и как структурообразователь высокоплотного и жесткого каркаса.

Плотная упаковка зерен заполнителя (наполнителя) вместе с цементной или цементно-песчаной оболочкой или частиц с межфазным слоем (элементов структуры) оптимальной толщины

на их поверхности создает жесткий каркас, вовлекающий в «работу» заполнитель или наполнитель.

Применение микронаполнителей (зол ТЭС, молотых минеральных материалов, диатомита и др.) позволяет экономить клинкерный фонд. Тем не менее в некоторых случаях эти добавки лишь повышают водопотребность бетонной смеси, вследствие чего экономия цемента оказывается незначительной или вовсе отсутствует. Объясняется это недостаточной изученностью механизма действия добавок непосредственно в бетонах.

Особый интерес представляют те случаи, когда при введении микронаполнителей повышается прочность бетона при одновременном росте водопотребности бетонной смеси и водоцементного отношения, что не согласуется с общими представлениями и законом водоцементного фактора. Явление это получило название «эффект микронаполнителя».

Но и в условиях декларированного ограничения расхода цемента ведущими учеными высказывались авторитетные мнения о том, что использование микронаполнителей позволяет не только экономить цемент (что практически невозможно без применения пластифицирующих добавок), но и повышать прочность цементных бетонов.

Так, Красным И.М. [1] предложено обоснование повышения прочности бетона при одновременном росте водопотребности бетонной смеси и величины водоцементного отношения при использовании микронаполнителей (понятие микронаполнителей им предложено не было), что не согласуется с законом водоцементного фактора. Было показано, что положительное влияние микронаполнителя связывается не только с его гидравлической активностью, но и с участием микрочастиц в формировании структур с более плотной упаковкой как в период ее нахождения в пластическом состоянии, так и в период камнеподобного состояния.

Для выяснения механизма эффекта влияния микронаполнителей в работе рассматривается модель уплотненной бетонной смеси, в которой вода заполняет весь межзерновой объем с некоторым избытком, образующим вокруг твердых частиц слой, необходимый для придания смеси текучести, а остаточный воздух распределен в виде отдельных пузырьков.

Известно, что зависимость прочности бетона от величины водоцементного отношения отражает то обстоятельство, что с изменением водоцементного отношения пропорционально изменяется и расстояние между зернами цемента  $\delta$ . Чем больше В/Ц и  $\delta$ , тем меньше концентрация кристаллогидратов и тем слабее контакт между зернами цемента, т. е. тем слабее цементный камень и бетон в целом.

При равных В/Ц в бетоне без добавки и с добавкой микронаполнителя равны и  $\delta$ . При отсутствии эффекта микронаполнителя были бы равны и прочности бетона. Увеличение прочности при добавлении микронаполнителя и неизменном или возрастающем В/Ц объясняется тем, что наиболее мелкие его частицы, близкие по размеру к коллоидным, располагаясь между зернами цемента или вблизи них, образуют либо новые центры кристаллизации, что ускоряет этот процесс и увеличивает прочность цементного камня и бетона, либо выполняют роль уплотняющего элемента, формируя структуру с максимальной степенью упаковки частиц.

Явление образования центров кристаллизации при введении посторонних частиц хорошо известно. Рост прочности бетона при введении микронаполнителя даже в тех случаях, когда возрастает В/Ц и  $\delta$  и снижается плотность упаковки, объясняется тем, что в двух противоположных по действию процессах (увеличение прочности контактной зоны цемента вследствие образования новых центров кристаллизации и уменьшение прочности из-за роста водоцементного отношения) превалирует первый.

Многими учеными отмечается роль частиц тонкодисперсных добавок в росте прочности бетона [2–5] различной гидравлической активности, не уточняя механизма их действия.

Выявлено, что эффект действия микронаполнителя связан, в первую очередь, с его удельной поверхностью (дисперсностью), увеличение которой приводит к снижению относительного количе-

ства микронаполнителя для достижения равного эффекта повышения прочности за счет образования наиболее мелкими его зернами (наноразмера) центров кристаллизации в контактной зоне цемента, дополнительно повышающих прочность цементного камня и бетона.

Замена части цемента золой существенно повышает прочность бетона, благодаря так называемой пуццоланической активности – способности золы вступать в химическое взаимодействие с продуктами гидратации цемента, образуя в бетоне новые соединения, что способствует уплотнению и уменьшению пор в затвердевшем бетоне [6].

Зола выполняет функции наполнителя – тонкокомолотой добавки (микронаполнителя). Положительный эффект, достигаемый благодаря наполнителю, – это снижение расхода цемента высоких марок при изготовлении низкомарочных бетонов и строительных растворов, повышение плотности бетонов, их водонепроницаемости и теплозащитных свойств.

Особую роль зола выполняет в высокопластичных смесях, когда уплотнение смесей, например в кассетных технологиях, вызывает их расслаиваемость.

Более высокая эффективность использования золы-уноса в бетонах достигается при ее комплексном применении с водоредуцирующими добавками – гиперпластификаторами.

Целью данной работы является выявление механизма формирования структуры тяжелых бетонов при использовании в качестве регулятора свойств систем комплекса органоминеральных добавок.

В качестве вяжущего в работе использовался ПЦ 400-Д20, ПЦ 500-Д0 с НГ = 25,5 %, в котором в качестве активной минеральной добавки используется гранулированный доменный шлак в количестве 13,5–15,0 %.

В качестве мелкого заполнителя в бетонную смесь применяли кварцевый песок, соответствующий требованиям ГОСТ 8736. Модуль крупности песка – 2,4, водопотребность – 8,15 %.

В качестве крупного заполнителя применяли гранодиоритовый щебень смеси фракций 5–10 мм и 10–20 мм с пустотностью 48,3 %.

В качестве тонкодисперсной минеральной добавки в бетон применялась зола-унос Рефтинской ГРЭС, получаемая от сжигания экибастузского угля.

Используемая зола-унос удовлетворяет требованиям ГОСТ 25818 «Золы-уноса тепловых станций для бетонов. Технические условия».

С целью оптимизации плотности упаковки частиц в системе «зола – цемент» зола-унос дополнительно размалывалась до обеспечения дисперсности частиц, снижающей средний характерный размер частиц вдвое по сравнению с частицами цемента. При этом удельная поверхность частиц золы повышалась до значений 3100–3300 см<sup>2</sup>/г.

Распределение частиц золы по размерам определялось лазерным анализатором частиц «Mіcro

## Строительные материалы и изделия

Sizer 201». Состав золы по размеру частиц и их доле приведен на рис. 1.

Известно, что эффект действия пластификаторов на основе поликарбоклатов весьма чувствителен ко многим факторам, и в частности, к виду вяжущего [7, 8]. С этой целью предварительно на цементном тесте была проанализирована эффективность действия различных пластификаторов – GLENIUM 51, Addiment FM 40, Sika ViscoCrete-3.

Критерием эффективности действия добавок являлся максимальный водоредуцирующий эффект при минимизации негативного влияния добавок на процессы схватывания цементного теста и твердения бетона в начальный период.

На цементных системах различной минеральной природы пластификаторы показывают разноречивый эффект [8]. При содержании добавок в количестве 0,5 % от массы вяжущего водоредуцирующее действие составляет: GLENIUM 51 – 23,5 % для ПЦ 400-Д20, 24,3 % для ПЦ 500-Д0-Н; Sika ViscoCrete-3 – 21,6 % для ПЦ 400-Д20 и 19,4 % для ПЦ 500-Д0-Н

Влияние используемых гиперпластификаторов на сроки схватывания цемента марок ПЦ 400-Д20 отражено на рис. 2.

Влияние добавок GLENIUM 51 и Sika ViscoCrete-3 на сроки схватывания различных марок цемента неоднозначно. GLENIUM 51 прямо пропорционально замедляет сроки схватывания

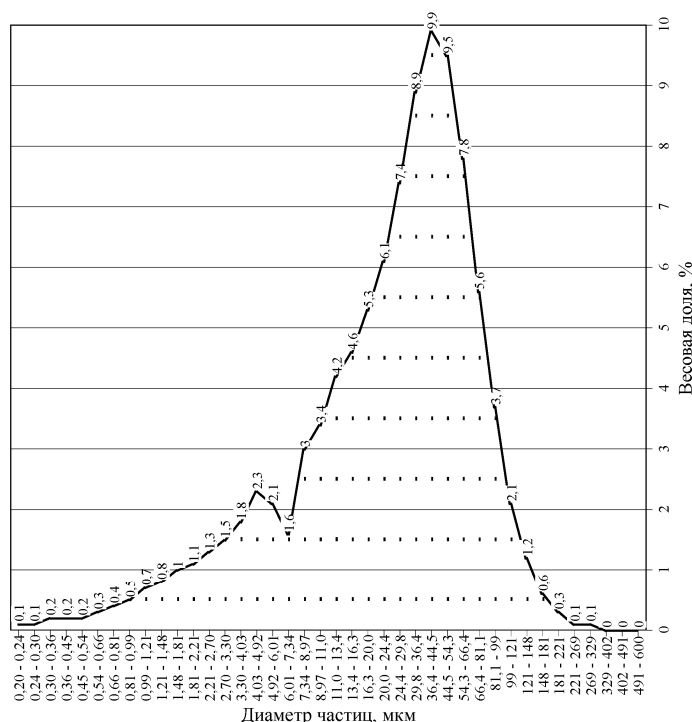


Рис. 1. Весовое распределение частиц золы-уноса

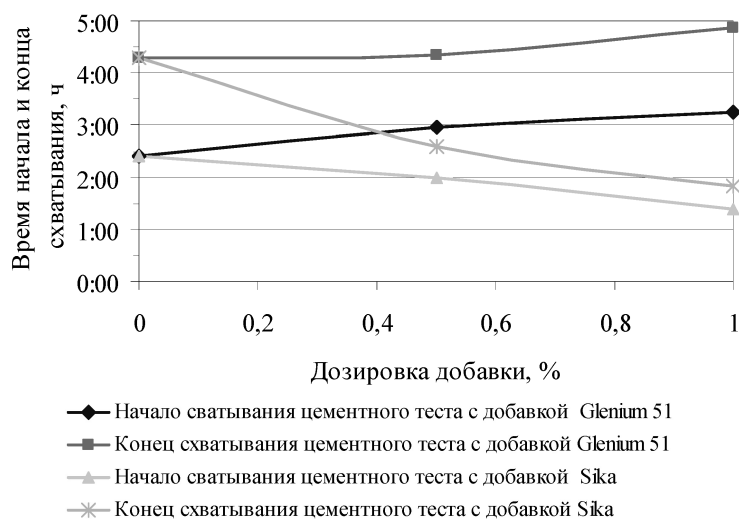


Рис. 2. Влияние GLENIUM 51 и Sika ViscoCrete-3 на сроки схватывания цемента ПЦ 400-Д20

обеих марок цемента: ПЦ 400-Д20 и ПЦ 500-Д0-Н. Полимерная основа водорастворимых пластифицирующих добавок предопределяет возможности дезагрегирования частичек вяжущего в результате адсорбирования на зернах цемента, что приводит к формированию на их поверхности пленок, тормозящих начальную гидратацию [9, 10].

Sika ViscoCrete-3 увеличивает сроки схватывания цемента марки ПЦ 500-Д0-Н, а сроки схватывания цемента марки ПЦ 400-Д20 с увеличением дозировки добавки резко сокращаются.

Из исследуемых гиперпластификаторов для дальнейшего проведения работ использовали GLENIUM 51 ввиду его более высокого водоредуцирования и схожего влияния на свойства различных цементных систем.

Все вышесказанное явилось основой проектирования составов бетонов, в которых обеспечивалась максимальная степень упаковки мелкодисперсных частиц в тесте вяжущего при одновременном снижении пластической прочности теста и его вязкости.

Оценка влияния дозировки золы-унос в составе вяжущего на реологические характеристики бетонных смесей и физико-механические характеристики бетонов при использовании цементов марок ПЦ 400-Д20 и ПЦ 500-Д0-Н проводилась с использованием математического планирования эксперимента – трехфакторных экспериментов – планов Хартли на гиперкубе.

Планирование эксперимента предусматривало моделирование таких составов бетонной смеси, которые бы обеспечивали изменение как технологических (удобоукладываемость смеси), так и нормативных (класс бетона по прочности на сжатие, марка бетона по морозостойкости) в широком интервале значений.

Расход компонентов на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси для всех составов матриц подбирался следующим образом: варьируемыми параметрами эксперимента являлись расход вяжущего на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси ( $X_1$ ), содержание золы в составе вяжущего ( $X_2$ ), количество воды затворения на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси ( $X_3$ ). Количество GLENIUM 51 для всех составов бетонной смеси было постоянным и равным 0,6 % от массы вяжущего.

Заформованные бетонные образцы твердели в условиях ТВО по режиму 2 + 6 + 9 + 2 ч (85 °С), а в последующем набирали прочность в нормальных условиях (температура (20 ± 2) °С, относительная влажность воздуха 95 %).

Средние значения результатов прочностных испытаний приведены в таблице.

После математической обработки результатов эксперимента были получены адекватные (при доверительной вероятности 0,95) математические модели параметров оптимизации  $Y$  от варьируемых факторов  $X_i$  в виде отрезков степенных рядов вида

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i X_i + \sum_{i=1 \neq j}^n b_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} X_i^2,$$

где  $n$  – число факторов эксперимента.

Зола-унос в бетонной смеси неоднозначно влияет на ее удобоукладываемость (рис. 3).

При постоянном расходе вяжущего в составе бетона увеличение расхода золы снижает подвижность смеси тем больше, чем выше расход вяжущего при любых расходах воды затворения. Увеличение расхода вяжущего, как и следовало ожидать, является значимым фактором повышения удобоукладываемости за счет возрастания в бетонной смеси объемной доли теста вяжущего с одновременным снижением его вязкости при увеличении дозировки воды затворения. Однако с

Сводная таблица результатов эксперимента

№	ОК, см	Фактическая плотность бетона, кг/м <sup>3</sup>	Предел прочности, МПа				
			при сжатии в возрасте, сут				на растяжении при раскалывании ( $R_{II}$ ) в возрасте, сут
			после ТВО	28	60	720	
1	5	2380	23,4	29,9	33,4	45,6	2,10
2	20	2440	39,6	52,0	54,1	61,0	3,37
3	22	2430	30,9	41,1	43,8	48,3	2,91
4	9	2470	16,1	22,4	25,5	34,9	1,52
5	1	2430	19,6	25,1	29,8	41,5	2,02
6	0	2420	19,3	21,2	26,8	33,8	1,70
7	4	2380	17,1	21,7	22,3	31,9	1,76
8	1	2200	24,1	30,4	30,9	42,0	2,51
9	0	2310	26,1	23,7	30,1	44,5	2,20
10	0	2360	32,3	33,4	41,5	47,9	2,90
11	7	2400	26,0	32,2	39,8	50,1	2,45
12	2	2370	21,1	20,9	23,7	35,8	1,45
13	0	2340	19,0	24,4	27,5	33,5	1,97
14	16	2390	21,4	28,3	32,7	37,8	1,94
15	1	2420	28,9	32,8	37,1	46,0	2,37

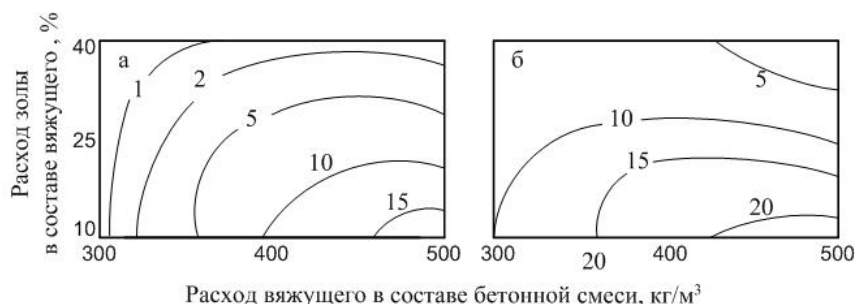


Рис. 3. Изолинии удобоукладываемости бетонной смеси, см, при расходе воды затворения: а – 178 л/м<sup>3</sup>; б – 210 л/м<sup>3</sup>

повышением доли золы-унос в составе вяжущего свыше 30 % картина качественно меняется. Увеличение расхода вяжущего, особенно в интервале свыше 400 кг/м<sup>3</sup>, в составе бетонной смеси в этом случае малозначимо влияет на изменение удобоукладываемости.

Прочность бетона на сжатие для всех режимов и сроков твердения (рис. 4), растяжение при раскалывании понижаются с увеличением содержания золы-унос в составе вяжущего, снижением расхода самого вяжущего и увеличением воды затворения в рамках эксперимента.

Изменение предела прочности бетона на сжатие представлено линиями равных значений прочности на рис. 4.

При пониженных расходах вяжущего (порядка 350 кг/м<sup>3</sup>) увеличение дозировки золы-унос в составе вяжущего приводит к незначительному

понижению прочности бетона; с увеличением расхода вяжущего позитивное влияние дозировки золы на прочность бетона возрастает.

Установлено, что при фиксированной дозировке в составе вяжущего золы-унос в процентном отношении прочность бетона возрастает с увеличением расхода вяжущего в составе бетонной смеси. И этот факт установлен для смесей с постоянным значением величины расхода воды затворения.

Рассматривая составы бетонной смеси с равными значениями прочности на сжатие (например, 30 МПа, см. рис. 4, б), можно утверждать следующее. Равные значения прочности обеспечиваются у бетонов с расходом вяжущего 330 кг/м<sup>3</sup> (золы 10 %, цемента 297 кг) и 390 кг/м<sup>3</sup> (золы 25 %, цемента 292 кг). Таким образом, при постоянстве водоцементного отношения увеличение дозировки золы в составе вяжущего не снижает механические

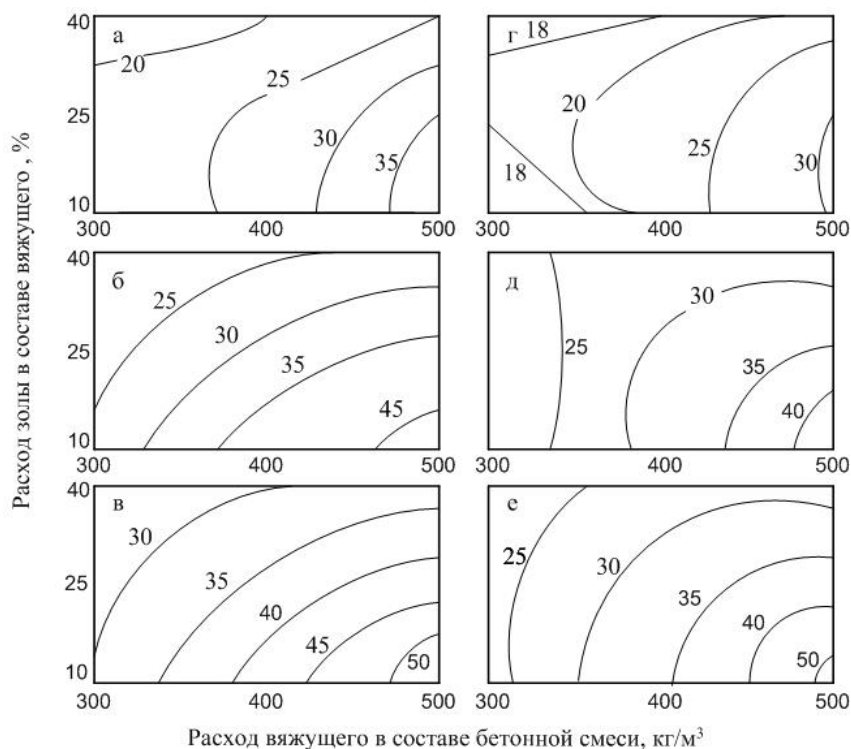


Рис. 4. Линии равных значений предела прочности при сжатии бетонов с добавкой золы-унос: а, б, в – при расходе воды затворения 178 и г, д, е – 210 л/м<sup>3</sup>; после: а, г – ТВО; б, д – 28 суток и в, е – 60 суток дополнительного твердения в нормальных условиях

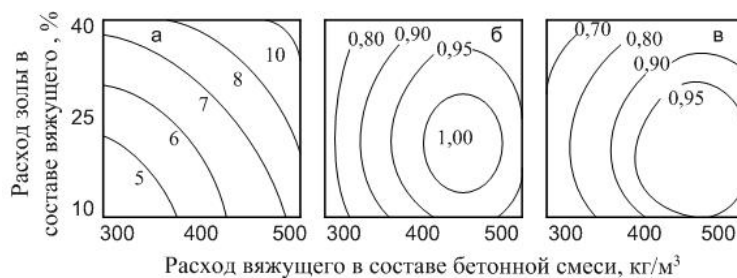


Рис. 5. Изменение водопоглощения по массе бетона (а) и коэффициента морозостойкости после 5 циклов (F 200) при расходе воды затворения: а, б – 194 л/м<sup>3</sup>; в – 210 л/м<sup>3</sup>

характеристики бетона, улучшая реологические свойства бетонных смесей и трещиностойкость композита.

Долговечность бетонов оценивалась путем определения морозостойкости бетонов (ГОСТ 10060, ускоренный метод замораживанием при –50 °С, параллельно по dilatометрическому методу) при дополнительном определении параметров пористости бетона (рис. 5).

Отмечено, что модифицирование структуры цементного камня введением комплексных добавок на основе тонкодисперсного компонента нарушает известные зависимости морозостойкости бетона, например, от величины открытой пористости [8]. Обсуждение этого факта является предметом последующих публикаций. Здесь же можно констатировать, что и в случае применения зол в тяжелых бетонах возможно получение марок по морозостойкости не ниже F 200.

Результаты экспериментальных исследований были положены в основу рекомендаций по расходу цемента с использованием золы-унос для номенклатуры железобетонных конструкций и технологий их изготовления в ООО «ПСО КПД и СК» г. Челябинска.

#### Выводы

1. Подтверждено, что применение комплекса «тонкодисперсный компонент+пластификатор» является эффективным средством адсорбционного модифицирования структуры цементного камня и, как следствие, свойств бетона. Минеральный наполнитель полифункционален. Он влияет на формирование структуры тяжелых бетонов как на стадии пластического состояния дисперсных систем, так и на стадии твердого состояния.

2. Полученные математические зависимости являются эффективным аппаратом оперативного регулирования составов бетонных смесей в условиях реальной нестабильности свойств используемых материалов вариации параметров технологического процесса.

3. Практическое использование результатов исследований уже позволяет получать предприятию реальный экономический эффект не только за счет экономии цемента, но и за счет повышения качества поверхностей сборных ЖБК.

#### Литература

1. Красный, И.М. О механизме повышения прочности бетона при введении микронаполнителя / И.М. Красный // Бетон и железобетон. – 1987. – № 5. – С. 10–11.
2. Pistill, M.F. Variability of Condensed Silica Fume from a Canadian Source and its Influence on the Properties of Portland Cement / M.F. Pistill // Cement, Concrete and Aggregate. – 1984. – Vol. 6, № 1. – P. 33–37.
3. Особенности процесса гидратации и твердения цементного камня с модифицирующими добавками / В.И. Калашиников, С.В. Демьянова, И.Е. Ильина, С.В. Калашиников // Изв. вузов. Строительство. – 2003. – Вып. 36. – С. 26–29.
4. Buchenau, G. Gesteinsmehle für selbstverdichtenden Beton / G. Buchenau, B. Hillemeier // Betonwerk+Fertigteilechnik. – 2001. – № 11. – S. 32–38.
5. Тарасова, В.Н. Эффективность применения тонкомолотых цементов с различными микронаполнителями и пластифицирующими добавками / В.Н. Тарасова, В.Г. Довжик // Экономия цемента и повышение качества бетона в производстве сборного железобетона. – М.: МДНТП им. Ф.Э. Дзержинского, 1990. – С. 65–70.
6. Власов, В.К. Закономерности оптимизации состава бетона с дисперсными минеральными добавками / В.К. Власов // Бетон и железобетон. – 1993. – № 4. – С. 10–12.
7. Баженов, Ю.М. Модифицированные высококачественные бетоны / Ю.М. Баженов, В.С. Демьянова, В.И. Калашиников. – М.: АСВ, 2006. – 368 с.
8. Демьянова, В.С. Методологические и технологические основы производства высокопрочных бетонов / В.С. Демьянова, В.И. Калашиников // Обзорная информация. – М.: ВНИИТПИ, 2003. – Вып. 3.
9. Добавки в бетон: справ. пособие / В.С. Рамачандран, Р.Ф. Фельдман, М. Коллепарди и др.; под ред. В.С. Рамачандрана; пер с англ. Т.И. Розенберг, С. А. Болдырева; под ред. А.С. Болдырева и В.Б. Ратинова. – М.: Стройиздат, 1988. – 575 с.
10. Уиеров-Маршак, А.В. Методологические аспекты современной технологии бетона / А.В. Уиеров-Маршак, Т.В. Бабаевская // Бетон и железобетон. – 2002. – № 1. – С. 5–7.

Поступила в редакцию 24 февраля 2012 г.