

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

**СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ВНЕДРЕНИЯ  
ЕВРОПЕЙСКИХ СТАНДАРТОВ  
В ОБЛАСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА**

(г. Минск, БНТУ — 27-28.05.2014)

УДК 621.762; 691.002(032)

**ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ПОДБОРА СОСТАВА  
И ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ТЯЖЕЛОГО  
ВЫСОКОПРОЧНОГО БЕТОНА, ВКЛЮЧАЯ ВВЕДЕНИЕ  
В СОСТАВ УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ**

*РЯБЧИКОВ П.В., БАТЯНОВСКИЙ Э.И., ЯКИМОВИЧ В.Д.*

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь

**Введение**

В мировой строительной практике и исследовательской деятельности по направлению разработки технологии получения и применения бетонов прочностью до 150 МПа и более вопросы подбора составов находятся в стадии разработки. При этом конкретной информации, взаимосвязывающей достижения в обеспечении высокой прочности бетона с методикой теоретического расчета его состава, отсутствуют. Это положение естественно, во-первых, из-за относительно малого опыта использования бетонов прочностью 100...150 МПа и более, а во-вторых, - в соответствии с устремлением разработчиков сохранить конкретику своих достижений и приоритет за собой.

Вместе с тем, обобщение данных литературных источников по проблеме и накопленный (на кафедре «Технология бетона и строительные материалы» и научно-исследовательской и испытательной лаборатории бетонов и строительных материалов БНТУ) опыт ра-

боты с бетонами прочностью до 150 МПа, позволяет сформулировать важнейшее положение по разработке составов тяжелого бетона. Это относится как к требованиям к материалам для бетона, так и их содержанию и соотношению в составах бетона различного уровня прочности.

Следует отметить, что обеспечение роста прочности бетона базируется на повышении его структурной плотности и, соответственно, росте непроницаемости и способности сопротивляться агрессивным эксплуатационным воздействием. В результате параллельно с понятием «высокопрочных бетонов» развиваются направления, отражающие его эксплуатационную эффективность. По-прежнему основной тенденцией в строительстве является использование бетона со все более высокой прочностью на сжатие. «Высокопрочным», т.е. бетоном, показатель прочности которого находится выше обычного уровня, сегодня считается тяжелый бетон, характеризующийся прочностью на сжатие более 60 МПа. При использовании традиционных для практики исходных материалов, способов обработки и высокоэффективных пластификаторов уже получены бетоны (и изготовлены конструкции) прочностью на сжатие до 150 МПа; на стадии разработки находятся бетон большей прочности на сжатие.

Понятие «высокоэффективный» бетон дает понять, что во многих случаях критерии долговечности имеют более важное (или соответственно такое же) значение, как и прочность (таблица 1).

Таблица 1

#### Определение высокопрочного и высокоэффективного бетона

	Обозначение	
	Высокопрочный бетон	Высокоэффективный бетон
Определение	Прочность на сжатие > 60 МПа	Виды бетона, разработанные и соответствующие специальным высоким требованиям по эксплуатации, например требованиям по: <ul style="list-style-type: none"> <li>• непроницаемости,</li> <li>• устойчивости к физическим и химическим воздействиям,</li> <li>• прочности</li> </ul>
Преимущественная область применения	Несущая способность	Долговечность
	Высокая прочность	Плотная структура

Так как устойчивость бетона к воздействию внешних факторов определяется особо плотной структурой, то «высокопрочный» и «высокоэффективный» бетон с технологической точки зрения, как правило, не различаются. Иногда понятие «высокоэффективный бетон» применяется и для других видов бетона, свойства и состав которых выходят за границы обычного бетона, например, для самоуплотняющегося бетона.

### Исходные посылки для разработки составов высокопрочного бетона

*Водоцементное соотношение.* Для изготовления высокопрочных видов (классов) бетона необходим уровень водоцементного соотношения  $< 0,35$ . Нижняя граница  $(В/Ц)_6$  ограничивается обеспечением требуемой формуемости (удобукладываемости) и качеством пластифицирующих добавок; в настоящее время соответствует примерно  $0,20$  при условии использования высококачественных компонентов (см. рисунок 1).

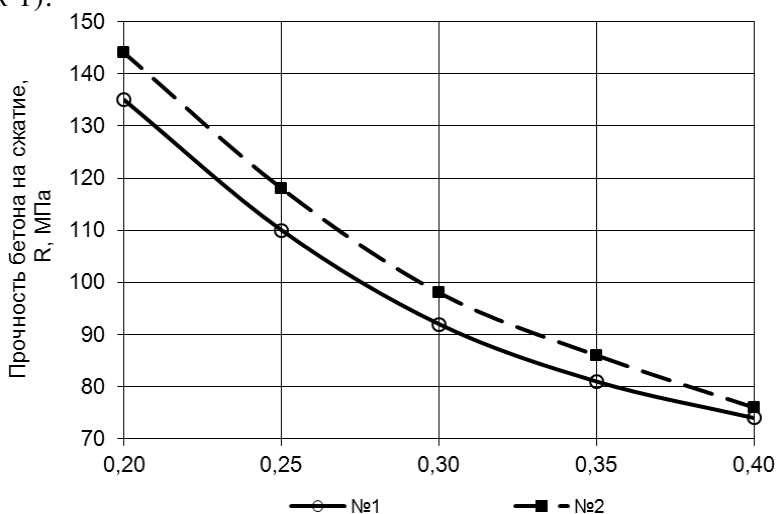


Рис. 1. Тенденция зависимости прочности бетона на сжатие от эквивалентного водоцементного соотношения для высокопрочных бетонов ( $В/Ц \sim В/(Ц + МК)$ ); №1 – данные норм Германии; №2 – данные авторов статьи

*Виды цемента.* Для высокопрочного бетона общестроительного назначения целесообразно использовать стандарт-

ные виды и марки (классы) цемента. В частности, ПЦ500 – Д0 (СЕМ 1 42,5 R) ПЦ 550 – Д0; ПЦ 600 – Д0 (СЕМ 1 52,5 R и СЕМ 1 52,5 N); содержание цемента, как правило, составляет от 350 кг/м<sup>3</sup> до 600 кг/м<sup>3</sup>.

*Заполнители.* В высокопрочном бетоне уменьшается разница в прочности между заполнителем и цементным камнем, что увеличивает влияние заполнителей на показатели прочности бетона. Для обеспечения прочности на сжатие более 100 МПа необходимы дробленые заполнители из прочных горных пород: базальта, диабазы и мелафира, характеризующихся прочностью породы до 500 МПа (иногда – более).

Порода гранита (РУПП «Гранит») характеризуется меньшей прочностью, поэтому важно для высокопрочного бетона получать материал с уровнем прочности (по дробимости) не ниже ~ 120...140 МПа.

*Песок* для высокопрочного бетона собственной гарнулометрией дополняет общую гранулометрию заполнителя и в этой взаимосвязи может использоваться как материал крупностью до 5 мм, так и с ограничением крупности в зависимости от минимальной крупности применяемого щебня. В частности, при разработке составов бетона прочностью более 120 МПа опробирован песок крупностью до 1,25 мм.

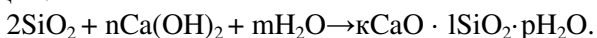
*Активные и неактивные микродобавки.* В качестве активных минеральных добавок в мировой практике используют в основном *микрокремнезем* (микросилиция, силикатная пыль) либо *микрорезиноиды*.

*Микрокремнезем* – с содержанием аморфного диоксида кремния не менее 85 % по массе, удельная поверхность (по методу БЭТ) ~ 15,0 м<sup>2</sup>/г. Роль микрокремнезема в формировании структуры и свойств бетона заключается в следующем. Микрокремнезем представляет собой побочный продукт металлургического производства при выплавке ферросилиция и его сплавов, образующийся в результате восстановления углеродом кварца высокой чистоты в электропечах. В процессе выплавки кремниевых сплавов некоторая часть монооксида кремния SiO переходит в газообразное состояние и, подвергаясь окислению и конденсации, образует чрезвычайно мелкий продукт в виде шарообразных частиц с высоким содержанием

аморфного кремнезема с удельной поверхностью порядка 14...30 м<sup>2</sup>/г.

Гранулометрический состав микрокремнезема свидетельствует о том, что размер большинства частиц не превышает 1 микрона, а средний размер частиц составляет около 0,1 микрона, т.е. примерно в 100 раз меньше «среднего» размера «зерна» цемента.

Дисперсность и значительная удельная поверхность зерен аморфного кремнезема обуславливают высокие пуццоланические свойства и его позитивное влияние на свойства бетона. Кремнезем в таком виде легко вступает в реакцию с гидроксидом кальция, высвобождаемой в процессе гидратации цемента, повышая тем самым количество гидратированных силикатов типа CSH в результате реакции:



Добавка в бетон микрокремнезема приводит к уплотнению структуры в целом и, особенно, контактной переходной зоны за счет реакции с Ca(OH)<sub>2</sub>. В результате снижается ее пористость, возрастает качество (силы) сцепления цементного камня с заполнителем (и арматурой в железобетоне). Пуццоланические реакции, как фактор химического воздействия, вызывают дальнейшее повышение плотности и прочности бетона.

Одновременно, тонкодисперсные частицы микрокремнезема могут служить «центрами кристаллизации» вокруг которых с меньшими затратами энергии, а значит – и в более высоком темпе, формируются кристаллогидратные новообразования – продукты взаимодействия клинкерных минералов цемента с водой. Являясь своеобразной «подложкой» мельчайшие частицы микрокремнезема катализируют процесс формирования кристаллогидратной структуры в твердеющем цементном камне, что отражается в росте темпа «набора» прочности бетоном.

Кроме изложенного, нельзя исключать развитие реакции между аморфным SiO<sub>2</sub> и Ca(OH)<sub>2</sub> не только по ранее приведенной схеме, относящейся к уплотнению и упрочнению контактной переходной зоны между цементным камнем и заполнителем, но (и даже в первую очередь) следует учитывать ее развитие по ходу гидролизно-гидратационного взаимодействия цемента с водой. Очевидно, что появление с первых минут этого взаимодействия в жидкости щелочи вызовет развитие реакции с кремнеземом, что, в свою оче-

редь, будет способствовать повышению скорости гидролиза и гидратации трех и двух кальциевого силиката клинкерной части цемента.

Все это в совокупности и определяет роль микрокремнезема в формировании более плотной и прочной структуры цементного камня и бетона в целом и необходимость его использования для получения бетона повышенной прочности.

*Каменная мука* – структурирующий компонент цементного теста (а в затвердевшем бетоне – цементного камня) вводится в состав высокопрочного бетона в виде тонкоизмельченного порошкообразного материала из прочных горных пород. В частности, молотого базальта, исходная прочность которого достигает 500 МПа (редко – более).

Роль данного компонента в высокопрочном бетоне неоднозначна. С одной стороны, он инертен и не вступает в реакции химического взаимодействия с продуктами гидратации клинкерных минералов, а с другой - обеспечивает повышение качественных характеристик бетона.

В частности, тонкодисперсные зерна микронаполнителя являются физической подложкой для формирования гидрокристаллических новообразований – продуктов взаимодействия цемента с водой по аналогии с таковыми частицами микрокремнезема.

Кроме этого, адсорбируя часть воды затворения и, будучи равномерно распределены в объеме цементного теста (и бетона), они стабилизируют его структуру, что особенно важно для литых и высокопластичных бетонных смесей. Удерживаемая ими вода в дальнейшем перераспределяется и «уходит» на реакции гидратации цемента, поддерживая их развитие во времени и снижая отрицательный эффект от «аутогенной» усадки цементного камня. Это особенно важно для высокопрочного бетона, характеризующегося низким водоцементным отношением и недостатком воды для развития гидратационного процесса во времени.

С учетом отсутствия в Беларуси разработки базальтовых и иных высокопрочных горных пород в качестве каменной муки в исследованиях использовался молотый гранитный отсев РУПП «Гранит». Степень его измельчения принята равной  $S_y \sim 0,3 \text{ м}^2/\text{г}$  (по прибору типа «ПСХ») т.е. соответствует тонине стандартных цементов.

Следует отметить, что связывание и перевод аморфным кремнеземом  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в нерастворимые гидросиликаты кальция требует исследований и оценки защитной способности высокопрочных бетонов по отношению к стальной арматуре, т.к. возможно ее снижение (из-за понижения с течением времени рН- фактора бетона), несмотря на рост его плотности.

*Добавки в бетон.* Без высокоэффективных «разжижителей» с бетоном при очень низком водоцементном отношении работать невозможно как на стадии приготовления, так и при укладке в формы (опалубку). Необходимое количество добавок увеличивается с уменьшением водоцементного отношения и ростом дозировки твердофазных дисперсных микродобавок, характеризующихся развитой удельной поверхностью и высокой адсорбционной активностью и способностью.

Наиболее эффективно использование добавок на основе поликарбоксилатов, т.е. «гиперпластификаторов», что подтверждено настоящими исследованиями.

*Общепризнанных методов подбора составов бетонов прочности в 100 МПа и более не существует.* Применение методов подбора состава традиционных по прочности бетонов (проф. И.Н. Ахвердова; метода «абсолютных» объемов; метода «НИИЖБ» Госстроя СССР и других вариантов), базирующихся на линейной закономерности взаимосвязи «прочность бетона - водоцементное отношение» не годится при ее увеличении до 100 МПа и более.

В этой связи по результатам выполненных исследований предлагается следующая методика подбора составов бетона прочностью в 100...150 МПа, положения которой могут совершенствоваться с учетом конкретики ведения бетонных работ.

### **Предлагаемая методика подбора состава высокопрочного бетона**

Определяют качественные характеристики используемых материалов на соответствие требований к ним.

Определяют расчетное водоцементное отношение бетона, используя данные рисунка для требуемой прочности бетона.

Определяют расчетное содержание цемента в бетоне, используя данные таблицы 2.

Назначение расчетного содержания цемента в высокопрочном бетоне взаимоувязывается с введением в состав вяжущего добавки микрокремнезема и общим содержанием заполнителя (мелкого и крупного), а также введение микронаполнителя – каменной муки (в нашем случае – молотого гранитного отсева).

Определяют долевое (относительно цемента) содержание в составе вяжущего добавки микрокремнезема (рекомендуется в количестве от 5 % до 15 % по массе) и микронаполнителя (каменной муки в примерно равной пропорции для бетона прочностью  $\geq 120$  МПа) в зависимости от расчетного водоцементного отношения.

Таблица 2

Расчетное содержание цемента в высокопрочном бетоне

Прочность бетона, МПа		80	100	120	140...150
Содержание цемента (кг) на 1 м <sup>2</sup> бетона,	ПЦ 500-Д0	460...500	480...530	500...550	600...650
	<u>1 гр</u> СЕМ I 42,5R				
<u>марка</u> класс	ПЦ 600-Д0	-	450...500	480...530	500...550
	<u>1 гр</u> СЕМ I 52,5R				

Определяют содержание мелкого и крупного заполнителя в их примерном соотношении к цементу: Ц : П : КЗ ~ 1 : (0,9... 1,25) : (2,0...2,5), по массе.

Определяют дозировку пластифицирующей добавки в зависимости от требуемой подвижности (осадки конуса или растекания конуса). Рекомендуется в пределах (0,3...1,0) % по сухому веществу от массы цемента.

Готовят пробный замес для определения: формуемости (удобноукладываемости) по «ОК» или «РК»; средней плотности свежееотформованного бетона (для корректировки содержания компонентов); изготовления контрольных образцов.

Проводят испытания контрольных образцов; оценивают результаты испытаний; корректируют (при необходимости) расчет.



## **Особенности применения (введения) углеродных наноматериалов**

Установлено, что использование отечественных углеродных наноматериалов (УНМ) в дозировке 0,0005...0,05 % от массы цемента способствует росту прочности бетона к проектному возрасту на сжатие до 20% и несколько больше на осевое растяжение (определено раскалыванием образцов). Этот рост связан как с проявлением эффекта «центров кристаллизации» ультрадисперсных частиц УНМ, изломов и вершин нанотрубок, так и с эффектом «наноармирования» последними гидрокристаллических новообразований при формировании реакционных каемок вокруг цементных «ядер» в цементном камне.

*Введение УНМ в бетон* при приготовлении смеси может осуществляться вариантами: с цементом, если УНМ введен при его изготовлении (при помоле); введение (с распылением в бетоносмеситель с помощью сжатого воздуха) отдозированного вещества; введение его с водой затворения или введение после предварительного смешивания с мелким заполнителем (песком); введение в варианте химической добавки, содержащей УНМ (например, УКД-1).

*При непосредственном введении УНМ* в смеситель целесообразно применять вариант эжекции вещества, создавая условия распыления его в замкнутом объеме смесителя по площади поверхности перемешиваемой бетонной смеси.

*При введении с водой затворения* необходимо интенсивно смешать вещество УНМ с отдозированной на замес водой, что предпочтительно осуществлять в эмульгаторах ультразвукового принципа действия или механических эмульгаторах перед ее поступлением в смеситель.

*При введении с мелким заполнителем (песком)* или кремнеземом необходимо предварительное смешивание вещества УНМ с песком (кремнеземом), отдозированным на замес. Возможно смешивание непосредственно в бетоносмесителе при эжектировании или ином варианте равномерной подачи вещества УНМ в процессе перемешивания его с песком, как начальной фазы процесса приготовления бетонной смеси.

### **Особенности технологического процесса приготовления, укладки и твердения высокопрочного тяжелого бетона**

Технология приготовления высокопрочного бетона может быть реализована на бетоносмесительных установках (узла, цеха, производства), оснащенных бетоносмесителями принудительного принципа действия.

Отличием является необходимость наличия бункеров и дозаторов для подачи и дозирования микрокремнезема и каменной муки. Кроме этого, при существенных объемах выпускаемого высокопрочного бетона с использованием каменной муки, целесообразно предусмотреть установку шаровой мельницы для помола гранитного отсева.

Процесс приготовления высокопрочного бетона осуществляется в следующей последовательности:

- дозирование и подача в бетоносмеситель гранитного щебня;
- дозирование и подача части воды затворения ((30...50)%);
- перемешивание в течение 30...60 сек с последующим добавлением, при работающем бетоносмесителе, песка, цемента и оставшейся части воды затворения, раствора химической добавки и УНМ (при применении);
- подача и дозирование микрокремнезема, каменной муки и окончательное перемешивание бетонной смеси (при повышенном воздухоповлечении пластификатора – перед его введением в смесь);
- выгрузка приготовленной бетонной смеси в автобетоносмеситель и доставка его к месту укладки.

Общее время перемешивания бетонной смеси составляет 3...5 мин, в зависимости от требуемой подвижности смеси и прочих технологических факторов.

Транспортирование бетонной смеси высокопрочного бетона осуществляется с помощью транспортных средств и устройств (механизмов), используемых для транспортирования традиционных бетонных как в условиях заводского производства сборных изделий, так и при ведении бетонных работ на строительных площадках.

Период сохранения формовочных свойств бетонных смесей высокопрочного бетона на уровне, требуемом для конкретных условий работы с ним должен определяться строительной (или заводской) лабораторией. Следует учитывать общую тенденцию ускорения по-

тери формуемости бетонных смесей, содержащих до (10...15)% микрокремнезема и характеризующихся низким (<0,3) водоцементным отношением; особенно – при температуре смеси и окружающей среды >20<sup>0</sup>С.

При минусовой температуре окружающей среды не рекомендуется подогрев на стадии приготовления бетонной смеси более 15<sup>0</sup>С; не рекомендуется разогрев бетонной смеси перед укладкой более 30<sup>0</sup>С.

Рекомендуется для всех условий бетонирования, чтобы время от приготовления бетона до его укладки было минимально необходимым, а укладка бетона велась по возможности с максимальной интенсивностью.

Средства для приема, подачи и укладки бетона в формы или опалубку используют те же, что и при работе с традиционными бетонами соответствующей консистенции (формуемости, т.е. подвижности или жесткости).

Рекомендации по уходу за свежеложенным высокопрочным бетоном можно условно разделить на два основных периода: зимний период (твердение при отрицательной температуре окружающей среды) и летний период (высокая температура воздуха и низкая влажность).

Рекомендации по уходу за бетоном в летний период на начальной (первой) стадии его твердения в опалубке и после ее снятия или перемещения (вторая стадия) в сухих и жарких условиях в основном связаны с двумя факторами: необходимостью исключения потерь влаги бетоном (высушивания) и предотвращения перегрева высокопрочного бетона – превышение его температуры при твердении сверх 30...40<sup>0</sup> С.

*Влаго- гидроизоляция бетона* на первой стадии относится к неопалубленным поверхностям возводимых (устанавливаемых) конструкций.

На второй стадии (после снятия или перемещения опалубки) необходима защита всей открытой поверхности конструкций, кроме имеющих непосредственный контакт с пресной водой или находящейся в контакте с насыщенным ей грунтом (обратной засыпкой) если по проектной документации на устройство конструкции не предусмотрено иное решение.

Исключение из этого правила составляет использование несъемных опалубок и необходимость влаго – гидроизоляции относится к неопалубленным поверхностям на весь период твердения.

*Период (или время) защиты бетона* устанавливается в проектной документации (как и рекомендуемый вид ее реализации). Для высокопрочного бетона рекомендуется общий период защиты продолжительностью в 7 суток, но не менее 3 суток, если в проектной документации не установлен больший срок.

*Методы и приемы* влаго,- гидроизоляции или защиты бетона могут устанавливаться в проектной документации, а при отсутствии соответствующих указаний назначаться производителем бетонных работ.

*Влажностные приемы* защиты бетона включают: твердение под слоем воды, укрытие влагоемкими, насыщенными водой сыпучими или поризованными ковровыми материалами (периодически дополнительно увлажняемыми), периодический полив водой (при наличии соответствующих условий) и их комбинации.

*Защита гидроизолирующими материалами* осуществляется использованием покрывал из полиэтиленовых пленок, пергаминов, рубероидов и иных «рулонных» материалов с учетом того, что они способствуют возникновению «парникового эффекта», т.е. накоплению теплоты (особенно под влиянием солнечной энергии) и перегреву бетона.

*Защита пленкообразующими составами*, эффект которых заключается в том, что они легко наносятся на поверхность конструкций любой конфигурации распылением сжатым воздухом, а затем образуют на ней пленку, препятствующую испарению из бетона воды, - это вариант защиты наиболее быстро и с меньшими затратами реализуемый в условиях строительной площадки.

*Пленкообразующие составы:*

- водно-дисперсные (на различных парафинах);
- водные эмульсии (на полимерных смолах), могут быть темными (на нефтеполимерных смолах и битумах), светлыми (на парафинах), пигментированными (например бесцветными), светоотражающимися.

*Защита уплотняющими составами* (в частности, 5%-ым раствором  $Al_2SO_4$ , эффект которого заключается в создании плотного, трудно проницаемого поверхностного слоя цементного камня и не

приводит к перегреву бетона под воздействием солнечной радиации.

*Выбор метода и приемов защиты* твердеющего бетона рекомендуется осуществлять с учетом их эффективности, конструктивных особенностей возводимого (устанавливаемого) элемента здания (сооружения) и возможности реализации того или иного метода, конкретных условий ведения работ и требований к бетону. Безусловно, лучшими для высокопрочного бетона являются методы влажностной защиты и вариант с уплотнением структуры верхнего слоя бетона, т.к. они одновременно исключают «перегрев» бетона.

Рекомендации по уходу за бетоном в зимний период связаны с предотвращением замерзания бетонной смеси во время транспортирования ее к месту укладки, укладки в опалубку и начального периода ее твердения.

Это может быть реализовано следующими методами:

- использование предварительно разогретых компонентов бетонной смеси: щебень, песок, подогретая вода;
- использование утепленных автобетоносмесителей при доставке бетонной смеси;
- применение предварительного электроразогрева бетонной смеси на объекте, с последующим укрытием открытых участков бетонных конструкций тепло- и пароизоляционными материалами;
- использование специальных методов зимнего бетонирования: электродный прогрев бетона, прогрев бетона в греющих опалубках, обогрев бетона греющими проводами, индукционный нагрев бетона, бетонирование в тепляках и паропрогрев бетона.

Во всех случаях рекомендуемая температура разогрева (прогрева) бетона соответствует не более  $(30...35)^{\circ}\text{C}$ .

### **Заключение**

Материал статьи – это обобщение результатов исследований, выполненных в БНТУ по заказу Минстройархитектуры РБ.

Авторы предлагают сотрудничество с организациями, заинтересованными во внедрении высокопрочного бетона в строительное производство.

## ЛИТЕРАТУРА

1. П2-01 к СНиП 3.09.01-85 Изготовление сборных бетонных и железобетонных изделий.
2. СНБ 5.03.02-03 Производство сборных бетонных и железобетонных изделий.
3. СТБ 1035-96 Смеси бетонные. Технические условия.
4. СТБ 1112-098 Добавки для бетонов. Общие технические условия.
5. СТБ 1310-2002 Бетоны. Классификация. Общие технические требования.
6. СТБ 1321-2002 Щебень кубовидный из плотных горных пород. Технические условия.
7. СТБ 1544-2005 Бетоны конструкционные тяжелые. Технические условия.
8. СТБ EN 197-1-2007 Цемент Ч.1. Состав, спецификации и критерии соответствия общих цементов.
9. ГОСТ 8736-93 Песок для строительных работ. Технические условия.
10. ГОСТ 8267-93 Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия.
11. ГОСТ 10178-85 Портландцемент. Шлакопортландцемент. Технические условия.
12. EN 206-1 Бетон. Ч. 1: Установление требований, свойства, изготовление и соответствие.
13. Тейлор Х. Химия цемента. Пер. с англ. – М.: Мир, 1996. - С. 296-325.