

СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА.

УДК 691.32 (043.3)

Я. В. Астафьев, канд. техн. наук

ОСОБЕННОСТИ ПОДБОРА СОСТАВОВ И ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА БЕТОНОВ ИЗ САМОУПЛОТНЯЮЩИХСЯ СМЕСЕЙ НА ОСНОВЕ НАПРЯГАЮЩЕГО ЦЕМЕНТА

Обоснована эффективность применения напрягающего цемента для композиций самоуплотняющихся бетонных смесей. Изложены предложения по подбору составов бетонов из самоуплотняющихся смесей на основе напрягающего цемента исходя из заданных характеристик расширения бетона, приведены их основные свойства.

Введение

Конструктивные формы современных железобетонных элементов зданий и сооружений становятся все более сложными, необычными, требующими специальной технологии изготовления, что требует применения новых эффективных технологий приготовления и укладки бетонных смесей. В настоящее время с целью увеличения срока службы железобетонных конструкций в ряде стран (Японии, Великобритании, Германии, Дании и др.) разрабатывают системы технологических мероприятий в строительстве, среди которых особое место уделяется качественному уплотнению бетонных смесей. Одним из эффективных способов повышения качества строительства является применение самоуплотняющихся бетонных смесей, которые уплотняются под действием собственного веса. В Республике Беларусь при научном сопровождении института БелНИИС (рук. проф. Н. П. Блещик) проходит опытно-промышленное освоение технологии бетонов с повышенной консистенцией бетонной смеси [1]. Обладая способностью к уплотнению под действием собственного веса и одновременно имея высокую стойкость против сегрегации (что позволяет обеспечить заполнение опалубки густоармированных конструкций), сохраняя при этом способность к эффективному воздухоотделению, бетоны, получаемые из самоуплотняющихся смесей, относят к кате-

гории высококачественных [2–4]. Вместе с тем, несмотря на достигаемые очевидные преимущества, бетоны, выполненные из самоуплотняющихся смесей, имеют один существенный недостаток – значительные по величине усадочные деформации, проявляющиеся, как правило, в раннем возрасте [5]. Экспериментальные исследования и опыт эксплуатации конструкций, выполненных из таких бетонов, показывают, что связанные усадочные деформации приводят к образованию трещин, и, как следствие, – к снижению долговечности элементов конструкции. В последние годы ведутся обширные целенаправленные исследования по снижению усадочных деформаций в высококачественных бетонах [5]. Исследования по снижению или даже полной компенсации усадочных деформаций высокоподвижных бетонов можно условно разделить на следующие направления:

- применение химически синтезированных комплексных добавок, позволяющих уменьшить усадочные деформации за счет коэффициента поверхностного натяжения поровой воды;
- введение в состав минеральной части комплексной добавки расширяющегося компонента независимо от вида применяемого суперпластификатора [5];
- введение в состав заполнителей бетонной смеси водонасыщенных элементов, используемых в процессе гидра-

тации как некие резервуары, обеспечивающие «внутреннее увлажнение» (англ. «internal curing»);

– применение специальных расширяющихся вяжущих, способных не только компенсировать усадочные деформации, но и получить самоупнражения (напряжения сжатия) в железобетонной конструкции.

Обоснованное применение напрягающего цемента для композиций самоуплотняющихся бетонных смесей позволяет улучшить структуру цементного камня, а также показатели качества бетона (повышенные значения водонепроницаемости, стойкость к агрессивным воздействиям, морозостойкость, износоустойчивость).

Применение напрягающегося цемента в составах самоуплотняющихся бетонных смесей

Проектирование составов самоуплотняющихся бетонных смесей на основе напрягающего цемента основано на одновременном решении двух противоречивых задач. С одной стороны, необходимо обеспечить достижение требуемых реологических характеристик бетонных смесей, с другой – прочностных и деформационных характеристик затвердевшего бетона. Составы самоуплотняющихся бетонных смесей отличаются от традиционных наличием мелкодисперсных добавок-наполнителей, а также введением агента, модифицирующего вязкость жидкой фазы и совместимого с ним суперпластификатора. Введение этих компонентов, как правило, оказывает негативное влияние на деформации расширения самоуплотняющихся бетонов. Очевидно, что применение напрягающего цемента для составов самоуплотняющихся смесей вносит корректировки и в правила подбора составов таких бетонов.

При подборах составов самоуплотняющихся бетонных смесей на основе напрягающего цемента кроме требований по удобоукладываемости (заполняющая способность, проникающая способность, т.е. отсутствие блокировки между арматурой или узкими опалубочными полостями;

устойчивость к расслоению) возникает еще одно дополнительное требование, связанное с необходимостью получения требуемой величины самоупнражения бетона. С учетом этого при подборах составов таких бетонов необходимо:

– применять оптимальное количество минерального микронаполнителя;

– применять напрягающие цементы с высокой энергией расширения;

– увеличивать расход напрягающего цемента для обеспечения достаточного количества расширяющегося компонента в бетоне;

– уменьшать водовяжущее отношение;

– использовать суперпластификаторы, не снижающие самоупнражение, либо ограничить дозировку суперпластификаторов, уменьшающих величину самоупнражения.

– уменьшать содержание заполнителя, использовать более мелкую фракцию крупного заполнителя для уменьшения эффекта внутреннего ограничения.

Тонкодисперсный наполнитель является обязательной составляющей композиций самоуплотняющейся бетонной смеси. Применение тонкодисперсного наполнителя позволяет улучшить физико-технические свойства бетона, уменьшить тепловыделения вяжущего, экономить цемент. С другой стороны, применение тонкодисперсного наполнителя уменьшает величину самоупнражения и прочность. В связи с этим одной из важнейших задач является определение оптимального соотношения напрягающего цемента и тонкодисперсного наполнителя в самоуплотняющихся бетонных смесях, что и явилось основанием для исследования, результаты которого приводятся ниже.

Методика и результаты исследований

Определение оптимального соотношения напрягающего цемента к тонкодисперсному наполнителю производили, принимая во внимание требования

обеспечения прочностных и деформационных характеристик бетонов при достижении самоуплотняющимися смесями необходимых реологических характеристик. Выполнение одновременно двух основных технологических параметров (подвижности и вязкости) при варьировании соотношением напрягающего цемента и минерального тонкодисперсного наполнителя достигалось с учетом водопотребности вяжущей части для каждого соотношения и изменения дозировки суперпластификатора с целью получения свойств самоуплотнения. Количество пес-

ка в растворной части принимали постоянным для всех составов и равным 40 % от объема растворов. В табл. 1 приведены составы самоуплотняющихся растворов на основе напрягающего цемента и их основные технологические характеристики.

Дозировку суперпластификатора определяли экспериментально, исходя из условия, что относительный распыл конуса I_p равен 5 и время истечения растворной смеси из V-образной воронки должно составлять примерно 9–11 с [7].

Табл. 1. Составы самоуплотняющихся растворов и параметры вязкости и подвижности

Номер составов	Расход материалов, кг/м ³				С-3, % по массе цемента	Время истечения из V-образной воронки, с	Распыл конуса, см
	Напрягающий цемент	Доломитовая мука	Песок	Вода			
1	453,7	484,7	1060	270,7	1,00	9	24
2	524,4	407,5	1060	277,1	0,71	8	20
3	599,4	366,0	1060	268,5	1,03	10	23
4	640,7	322,1	1060	271,8	0,77	10	22
5	675,4	288,7	1060	273,2	0,65	10	19

В выполненных исследованиях использовали смесь портландцемента класса 42,5 с расширяющейся сульфоалюминатной добавкой. В качестве расширяющейся добавки применяли смесь глиноземистого цемента и двуводного гипса. Соотношение ШЦ:ГЦ:Г составляло 77:13:10. В качестве мелкодисперсного наполнителя использовали доломитовую муку (истинная плотность 2650 кг/м³, удельная поверхность 2900 см²/г). Мелкий заполнитель – песок с модулем крупности $M_k = 2,32$. Крупный заполнитель – щебень гранитный Микашевичского карьера фракции 5–10 мм ($\gamma = 1300$ кг/м³). Для получения требуемой подвижности использовали суперпластификатор С-3 по ТУ 6–36–0204229–625–90 (на базе сульфированных нафталинформальдегидных поликонденсатов).

Для оценки прочности растворов изготавливали образцы-балочки 160×40×40

(по три образца для каждого состава), половинки балочек испытывали на сжатие. Для определения самонапряжения растворов изготавливали образцы в виде кондукторов (по три образца для каждого состава) размером 160×40×40 мм. Испытания образцов проводили по стандартным методикам [8].

Анализируя результаты, представленные на рис. 1 и 2, и технологические параметры самоуплотняющихся растворов, приведенные в табл. 1, объемное отношение напрягающего цемента и мелкодисперсного наполнителя находится примерно в пределах от 1,6 до 1,8. Это подтверждается результатами, полученными в [6]. При данном соотношении напрягающего цемента и мелкодисперсного наполнителя существует возможность проектирования составов самоуплотняющихся бетонных смесей на основе напрягающего цемента с тре-

буемыми реологическими параметрами и прочностью бетонов.
максимальными самонапряжением и

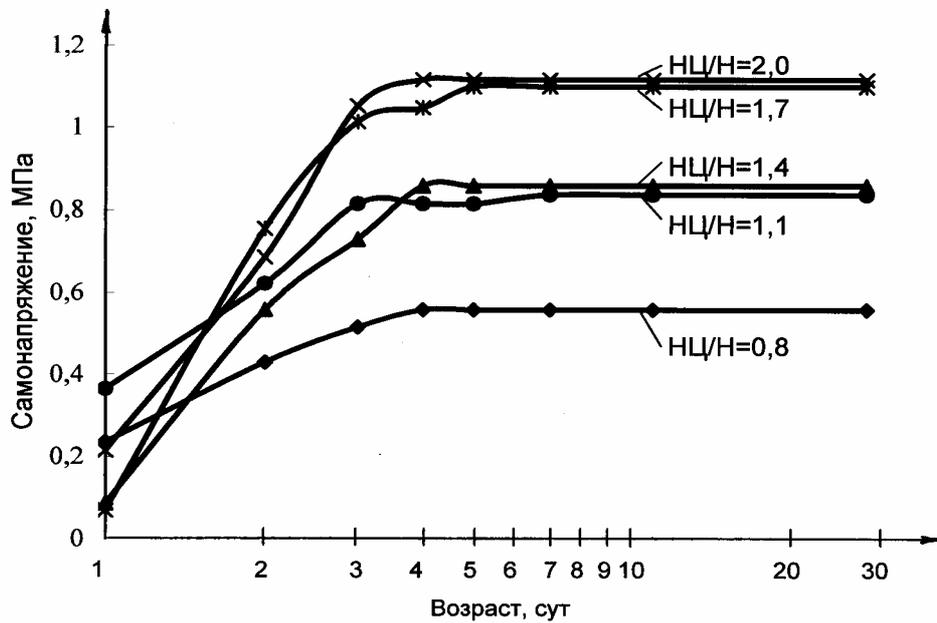


Рис. 1. Графики развития самонапряжения опытных образцов самоуплотняющихся растворов во времени

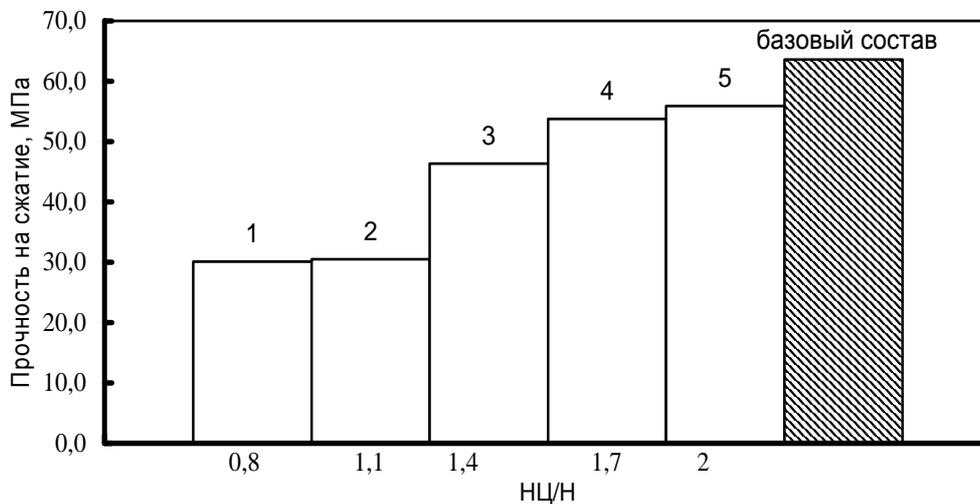


Рис. 2. Изменение прочности на сжатие опытных образцов растворной части в зависимости от соотношения напрягающего цемента и минерального тонкодисперсного наполнителя

Выполненные исследования показали, что присутствие в цементном камне мелкодисперсного наполнителя уменьшает энергоактивность матрицы, а применение традиционных суперпластификаторов поверхностно-активного принципа действия

оказывает существенное влияние на деформации расширения. В [2] это влияние объясняется механизмом действия традиционных пластификаторов поверхностно-активного типа на гидратирующую систему, в частности, при повышенном

содержании алюминатной составляющей (что свойственно для напрягающего цемента). В названных цементных системах наблюдается различие в характере формирования адсорбционного слоя пластифицирующего полимера на поверхностях гидратированных силикатных и алюмосодержащих фазах цемента [2]. Применение пластификатора на основе сульфированных нафталинформальдегидных соединений (С-3) приводит не только к изменению количества, но и к модификации кристаллов этtringита. Таким образом, установлено, что применение наиболее распространенного в строительной практике суперпластификатора С-3 неблагоприятно влияет на самонапряжение бетона. Дополнительно были выполнены исследования самоуплотняющихся бетонных смесей при применении суперпластификатора Melment F10 (на базе сульфированных нафталинформальдегидных поликонденсатов).

На рис. 3 показано влияние двух видов суперпластификаторов на развитие самонапряжения бетонов, выполненных из самоуплотняющихся смесей на основе напрягающего цемента, во времени. В представленных опытах использовался напря-

гающий цемент, состоящий из смеси портландцемента класса 42,5 с расширяющейся сульфоалюминатной добавкой. В качестве мелкодисперсного наполнителя использовалась доломитовая мука (истинная плотность 2650 кг/м^3 , удельная поверхность $2900 \text{ см}^2/\text{г}$). Расход напрягающего цемента и доломитовой муки составлял 426 и 202 кг/м^3 соответственно. Дозировка суперпластификатора С-3 (на базе сульфированных нафталинформальдегидных поликонденсатов) составляла $0,95 \%$ по весу цемента, а Melment F10 – 1% .

Уменьшение величины самонапряжения бетона с применением суперпластификатора С-3 по сравнению с бетоном базового состава составило 42% , а для бетонов с применением суперпластификатора Melment F10 – 30% .

С учетом этого при назначении составов самоуплотняющихся бетонов на основе напрягающегося цемента необходимо применять либо гиперпластификаторы со стерическим эффектом, либо увеличить энергоактивность напрягающего цемента.

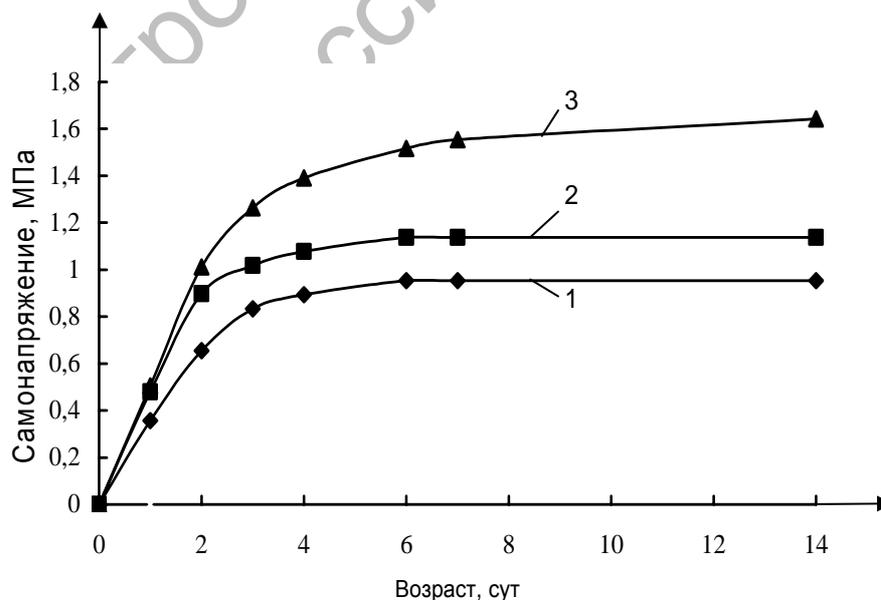


Рис. 3. Графики развития самонапряжения бетонов, полученных из самоуплотняющихся смесей на основе напрягающего цемента с использованием различных суперпластификаторов: 1 – бетон с применением суперпластификатора С-3; 2 – бетон с применением суперпластификатора Melment F10; 3 – базовый состав (без суперпластификатора)

Учитывая особенности структурообразования напрягающих бетонов и для получения напрягающего бетона с нормируемой величиной самоупрессия, рекомендуется принимать минимальный расход вяжущего не менее 400 кг/м^3 . Вместе с тем расход напрягающего цемента более 500 кг/м^3 может значительно увеличить тепловыделение бетона. Увеличение расхода вяжущей части $>0,24 \text{ м}^3$ может привести к снижению прочности и трещиностойкости бетона, отрицательно сказаться на его долговечности, а также вызвать повышенные деформации ползучести.

С другой стороны, уменьшение крупности зерен крупного заполнителя приводит к уменьшению эффекта внутреннего ограничения и вследствие этого к увеличению свободного расширения бетона. Также уменьшение крупности заполнителя благоприятно сказывается на технологических характеристиках самоуплотняющихся бетонных смесей и снижает риск блокировки между арматурой или узкими опалубочными полостями. С учетом этого для составов самоуплотняющихся бетонных смесей на основе напрягающего цемента рекомендуется ограничить максимальную крупность зерен крупного заполнителя размером 10 мм .

Предложения по подбору составов самоуплотняющихся смесей на основе напрягающего цемента

С учетом выполненных исследований подбор состава самоуплотняющихся смесей на основе напрягающего цемента может быть выполнен расчетно-экспериментальным способом в следующей последовательности.

1. Для обеспечения эффективных условий протекания процессов расширения расход напрягающего цемента на 1 м^3 бетонной смеси принимают не менее 400 кг .
2. Принимают объемное отношение напрягающего цемента к наполнителю $f_{об} = 1,6 \dots 1,8$.
3. Определяют расход минерального тонкодисперсного наполнителя:

$$H = \frac{Ц \cdot \rho_f}{f_{об} \cdot \rho_{cem}}, \quad (1)$$

где H , $Ц$ – расход минерального наполнителя и напрягающего цемента соответственно, кг ; $\rho_{сет}$ – истинная плотность цемента, кг/м^3 ; ρ_f – истинная плотность минерального наполнителя, кг/м^3 .

4. Рассчитывают объем вяжущей части в 1 м^3 бетонной смеси:

$$V_e = \frac{Ц}{\rho_{cem}} + \frac{H}{\rho_f} \leq 0,24. \quad (2)$$

При невыполнении условия (2) уменьшают расход цемента.

5. Проектируют составы растворов с объемным содержанием песка, равным 40% , и на пробных замесах определяют предварительную дозировку суперпластификатора исходя из технологических условий в соответствии с требованиями [7]. Окончательную дозировку суперпластификатора определяют на бетонных смесях.

6. Определив состав самоуплотняющейся бетонной смеси на основе напрягающегося цемента и характеристики материалов, рассчитывают величину самоупрессия бетона.

На рис. 4 приведены графики сравнения экспериментальных и расчетных значений величин самоупрессия, определенных для различных бетонов, выполненных из самоуплотняющихся смесей на основе напрягающего цемента, полученных в наших исследованиях [7, 8]. В составах бетонов варьировалась концентрация заполнителя в пределах от $0,5$ до $0,57$ и энергоактивность цементного теста.

Как видно из табл. 2, подобранные составы бетонных смесей по критериям подвижности и вязкости относятся к самоуплотняющимся, обеспечивая характеристики самоупрессия от $0,96$ до $1,13 \text{ МПа}$ при прочности на сжатие до 40 МПа . Признаков расслоения бетонной смеси не наблюдалось. Характеристики диаграмм деформирования бетонов при осевом сжатии приведены в табл. 3.

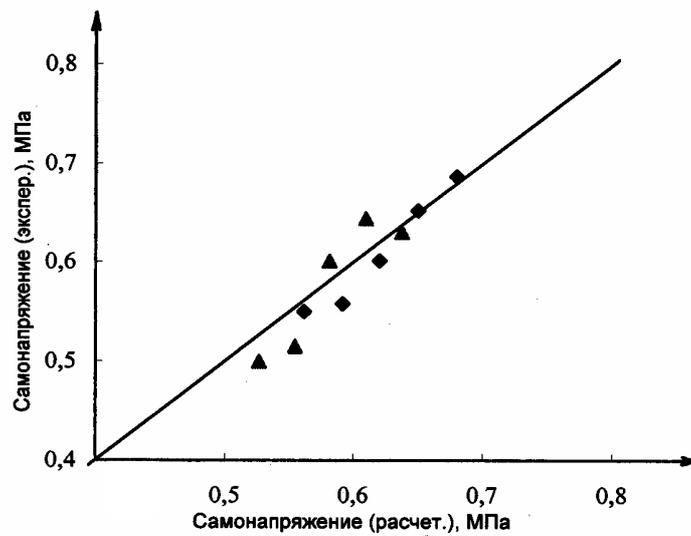


Рис. 4. Сравнение экспериментальных и расчетных значений величины самонапряжения для бетонов, выполненных из самоуплотняющихся смесей различных составов.

Табл. 2. Свойства самоуплотняющихся бетонных смесей и бетонов на основе напрягающего цемента

Характеристика	Параметры	Номер состава	
		1	2
Фактический состав бетона	Напрягающий цемент, кг/м ³	426	426
	Доломитовая мука, кг/м ³	202	202
	Вода, кг/м ³	194	194
	Песок, кг/м ³	721	721
	Щебень, кг/м ³	795	795
	C-3, % по весу цемента	0,95	–
	Melment F10, % по весу цемента	–	1
Характеристика бетонной смеси	Расплыв конуса, см	65	65
	Время достижения расплыва конуса 50 см, с	2,5	2,9
	Характеристика способности прохождения бетонной смеси через арматурные ограничения 2h _r -h _m , мм	13	15
Характеристика бетона	Прочность бетона при сжатии, МПа	38	39,5
	Самонапряжение, МПа	0,96	1,13
	Деформации свободного расширения, %	0,065	0,067
	Модуль упругости E, ГПа	28,6	30,3

Табл. 3. Характеристики полных диаграмм деформирования бетонов при осевом сжатии

Номер состава по табл. 2	Модуль упругости E _{см} , ГПа	Пиковое напряжение f _{см} , МПа	Относительная деформация	
			в пиковой точке ε _{с1} , ‰	предельная ε _{суп} , ‰
1	28,6	26,7	1,11	1,30
2	30,3	27,5	0,95	1,20
3 (базовый)	21,5	28,5	1.35	1,54

Модуль упругости бетона базового состава (3) оказался минимальным. Модуль упругости бетона из самоуплотнящейся смеси с применением суперпластификатора на основе сульфированных меламинов (2) оказался наибольшим, что, вероятно, следует связать со свойствами суперпластификатора и более значительной прочностью по сравнению с бетонами состава 1.

Заключение

Применение напрягающего цемента для композиций самоуплотняющихся бетонных смесей позволяет получать высококачественный материал с компенсированной усадкой или требуемым самонапряжением. Кроме того, использование напрягающегося цемента позволяет улучшить структуру цементного камня, а также показатели качества бетона (повышенные значения водонепроницаемости, стойкость к агрессивным воздействиям, морозостойкость, износостойчивость).

При подборах составов самоуплотняющихся бетонных смесей необходимо принимать расход напрягающего цемента не менее 400 кг/м^3 . Отношение напрягающего цемента к минеральному тонкодисперсному наполнителю следует принимать от 1,6 до 1,8. При данном соотношении существует возможность проектирования составов самоуплотняющихся бетонных смесей на основе напрягающего цемента с требуемыми реологическими параметрами и максимальными самонапряжением и прочностью бетонов. Для снижения риска блокировки самоуплотняющихся бетонных смесей между арматурой или узкими опалубочными полостями, а также для увеличения деформаций расширения бетонов рекомендуется ограничить максимальную крупность крупного заполнителя размером 10 мм.

Разработаны рекомендации по проектированию составов бетонов из самоуплотняющихся смесей на основе напрягающего цемента с требуемыми технологическими

параметрами исходя из заданных характеристик расширения и технология получения изделий из самоуплотняющихся бетонных смесей на основе напрягающего цемента. Выполнено опытное внедрение бетонов из самоуплотняющихся смесей при устройстве полов операционных блоков Брестской областной больницы.

Исследование прочностных и деформационных свойств бетонов из самоуплотняющихся смесей на основе напрягающегося цемента показало, что для материалов отечественного производства возможно получение бетонов из самоуплотняющихся смесей на основе напрягающего цемента с прочностью при сжатии 40 МПа, самонапряжением 0,96 МПа при несколько сниженном на 15 % модуле деформаций относительно напрягающего бетона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Блещик, Н. П.** Особенности и технические проблемы новых видов конструктивных бетонов / Н. П. Блещик // Строительная наука и техника. – 2005. – № 1. – С. 13–17.
2. **Тур, В. В.** Направления развития технологии бетона в третьем тысячелетии / В. В. Тур, О. Е. Игнашева // Архитектура и строительство. – 2002. – № 5. – С. 17–20.
3. Ouchi, Nakamura, Osterson, Hallberg, and Lwin. Applications of self-compacting concrete in Japan, Europe and the United States / 2003 ISHPC.
4. **Maekawa, K. & Ozawa K.** Development of SCC's prototype (written in Japanese), Self-Compacting High performance Concrete, Social System Institute / K. Maekawa. – 1999. – 10 March. – P. 20–32.
5. **Батудаева, А. В.** Высокопрочные модифицированные бетоны из самовыравнивающихся смесей / А. В. Батудаева, Г. С. Кардумян, С. С. Каприелов // Бетон и железобетон : науч.-техн. и произв. журн. – 2005. – № 4. – С. 23.
6. **Астафьев, Я. В.** Основные технологические параметры растворной части самоуплотняющихся бетонов на основе напрягающего цемента / Я. В. Астафьев // Вестн. Брестского государственного технического университета. – 2004. – № 1 (25). – С. 149–153.
7. **Астафьев, Я. В.** Применение положе-

ний теории «излишка пасты» при проектировании составов самоуплотняющихся бетонов на основе напрягающего цемента / Я. В. Астафьев // Приложение к Вестнику Брестского государственного технического университета. Строительство и архитектура : материалы XI междунар. науч.-метод. межвузовского семинара. – 2004. – Ч. 2. – С. 73–80.

8. Астафьев, Я. В. Особенности подбора композиций самоуплотняющихся бетонных смесей на основе напрягающего цемента / Я. В. Астафьев // Строительная наука и техника. – 2005. – № 1. – С. 13-17.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 26.09.2006

Y. V. Astafyev
Desing of self-compacting concrete
mixes based on expansive cement
Belarusian-Russian University

The effectiveness of expansive cement application in self-compacting concrete has been proved. The proposals on desing of the self-compacting concrete based on expansive cement have been stated using the specified concrete expansion characteristics, main propertys.