

Павлова И.П., канд. техн. наук, доцент;
Бондаренко В.М., канд. техн. наук
(БрГТУ, г. Брест)

АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ СТАЛЕТРУБОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА НАПРЯГАЮЩЕМ БЕТОНЕ

Для эффективного использования композитных сталетрубобетонных элементов необходимым условием является совместное действие ядра и оболочки. Один из перспективных способов обеспечения совместной работы стальной оболочки и бетонного ядра сталетрубобетонных элементов в поперечном направлении при действии продольных сжимающих усилий – применение бетонов на напрягающем цементе. Такие бетоны изготавливают на основе портландцемента и расширяющихся добавок. Среди разнообразия применяемых добавок особый интерес представляют алюминатно-сульфатные и алюмооксидные добавки, а также их комбинации, свойства которых определяются условиями гидратации и твердения алюминатов и сульфоалюминатов кальция, а также их соединений с силикатами и сульфатами.

Изучением условий образования гидрата сульфоалюмината кальция, его модификаций, порядка их превращений и устойчивостью структуры занимаются многие исследователи [1 – 3]. Однако единого взгляда относительно свойств гидратов сульфоалюмината кальция не установлено. Наоборот, во многих случаях высказывают прямо противоположные мнения.

С точки зрения применения напрягающего цемента и бетонов на его основе трубобетонные элементы обладают следующими особенностями:

- в процессе твердения бетона на напрягающем цементе практически невыполнимо его внешнее увлажнение, а следовательно, рост собственных деформаций происходит в условиях изоляции без доступа дополнительной свободной воды при гидратации, необходимой для перекристаллизации моносульфата в эттрингит;

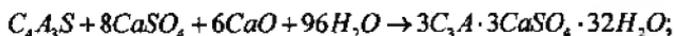
- процессу расширения напрягающего бетона препятствует внешняя стальная оболочка элемента, в результате чего твердеющее бетонное ядро находится в трехосном напряженном состоянии сжатия.

Таким образом, состав напрягающего цемента и бетона на его основе, используемого при изготовлении самонапряженных сталетрубобетонных элементов, должен обеспечивать большую энергию расширения (самонапряжения) в условиях трехосного ограничения без дополнительного увлажнения в процессе твердения.

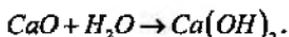
Как было отмечено выше, применение традиционных напрягающих цементов (типа М) [6] в сталетрубобетонных элементах оказывается неэффективным в связи с изолированными условиями твердения в условиях объемного ограничения, так как для реализации полного механизма расширения данного вяжущего через образование этtringита обязательным условием является дополнительный доступ свободной воды в процессе гидратации.

Для решения означенной проблемы было предложено использовать четырехкомпонентный состав, отличающийся от классического (типа М) введением в систему четвертой составляющей – добавки РСАМ [7], позволяющий осуществлять расширение по двум механизмам:

1) образование высокосульфатной формы гидросульфатоалюмината кальция (этtringита)



2) образование гидроксида кальция (портландита)



Применение добавок такого типа позволит получать необходимую величину самонапряжения бетона в изолированном состоянии без дополнительного увлажнения, варьируя как количественный состав напрягающего цемента, так и его расход.

Для экспериментальной проверки выдвинутых предположений был изготовлен напрягающий цемент, представляющий собой смесь портландцемента марки М500 Д0 с комплексной расширяющейся добавкой. В качестве расширяющейся добавки использовалась смесь глиноземистого цемента марки ГЦ-40, двуводного гипса и расширяющегося сульфатоалюминатного модификатора (РСАМ). Химический состав компонентов напрягающего цемента приведен в таблице 1. Массовые соотношения компонентов напрягающих цементов, использованных в экспериментальных исследованиях, приведены в таблице 2.

Таблица 1

Химический состав компонентов напрягающего цемента

Компоненты	Содержание окислов, %					
	Al_2O_3	CaO	SO_3	C_3A	MgO	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$
Портландцемент марки М500 Д0	4,6	64,88	2,14	5	1,61	–
Глиноземистый цемент	34,92	35,5	0,79	–	–	–
Гипс	–	–	–	–	–	75,1
РСАМ	7,8	32,71	24,22	–	1,68	–

Таблица 2

Массовые соотношения компонентов напрягающих цемента

Марка цемента	Массовое содержание компонентов, %			
	портландцемент М500 Д0 (ПЦ)	глиноземистый цемент (ГЦ)	гипс (Г)	рСАМ
НЦ1	63	15	12	10
НЦ2	72	11	9	8

Расход цемента назначался таким образом, чтобы получить бетоны с разными показателями расширения. Составы бетонных смесей, рассчитанные в соответствии с рекомендациями [8], приведены в таблице 3.

Таблица 3

Составы бетонных смесей

Марка бетонной смеси	Расход сырьевых материалов на 1 м ³ бетонной смеси						
	вяжущее		песок, кг	щебень, кг	В/Вяж	вода, л	ГП-1, л
	марка	расход, кг					
НБ1	НЦ1	664	550	900	0,43	282	5,08
НБ2	НЦ1	480	650	1010	0,45	213,5	3,67
НБ3	НЦ2	664	550	900	0,43	282	5,08

Высокое содержание алюминатной составляющей в композитном вяжущем приводит к потере:

- удобоукладываемости бетонной смеси;
- сокращению сроков схватывания.

Технология изготовления трубобетонных элементов [9] требует применения высокоподвижных смесей. Поэтому одним из основных требований при использовании напрягающего бетона в трубобетонных конструкциях является применение высокоэффективных пластификаторов. Кроме того, трубобетонные элементы преимущественно изготавливаются непосредственно на строительной площадке, а значит, к бетонным смесям также предъявляются жесткие требования по срокам схватывания и сохранению подвижности в течение определенного промежутка времени.

Применение традиционных суперпластификаторов, относящихся к ряду поверхностно активных веществ (ПАВ), неэффективно в связи с блокировкой высокоактивных алюминатов, которые являются источником расширения, о чем свидетельствует ряд исследований [10 – 13]. Поэтому для достижения требуемого пластифицирующего эффекта с одновременным сохранением жизнеспособности бетонной смеси на НЦ в качестве пластификатора применен суперпластификатор, относящийся к разряду поликар-

боксилатных, механизм действия которого, основанный на стерическом эффекте (рис. 1), наиболее эффективен с точки зрения получения максимальных деформаций расширения в высокоподвижных бетонах на НЦ [13].

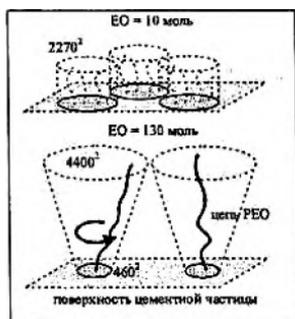


Рис. 1. Схематическое представление стерического эффекта при действии СП

Определение значений самоупругения напрягающих бетонов выполнено в соответствии с требованиями [15] на бетонных призмах размером $100 \times 100 \times 400$ мм в динамометрических кондукторах реализующих условия одноосного упругого ограничения с жесткостью эквивалентной продольному армированию в 1 %, а прочности на сжатие – по ГОСТ 10180-90 [16] на кубах с ребром 100 мм. При этом хранение кондукторов и кубов осуществлялось как в водных условиях, так и изолированных – без доступа дополнительной свободной воды в процессе гидратации.

Графическая интерпретация данных по определению самоупругения и прочности на сжатие бетонов НБ1-НБ3 представлена на рисунках 2 и 3, а основные результаты сведены в таблицы 4 и 5 соответственно.

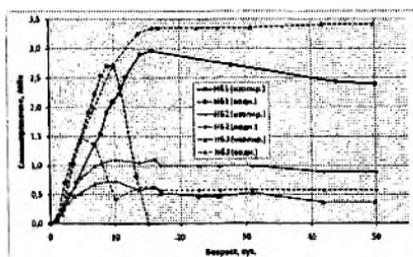


Рис. 2. Результаты определения самоупругения

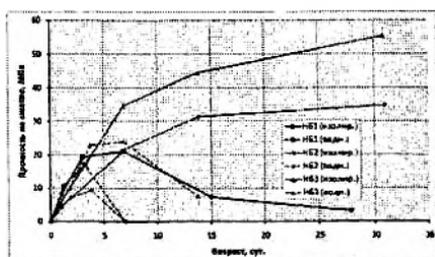


Рис. 3. Результаты определения прочности на сжатие

Таблица 4

Основные результаты определения самоупреждения бетонов по методике [15] при хранении образцов в изолированных условиях

Маркировка бетонных образцов	Самоупреждение по методике [15] при хранении в изолированных условиях				Состояние призм в кондукторах
	максимальное		в конце наблюдений		
	возраст, сут.	значение, МПа	возраст, сут.	значение, МПа	
НБ1	15,8	2,97 (7,2)	50 (27,8)	2,40 (3,1)	Видимых нарушений структуры бетона не выявлено
НБ2	10	1,10 (26)	50 (31)	0,89 (34,8)	Видимых нарушений структуры бетона не выявлено
НБ3	9,9	0,74 (39)	50 (31)	0,37 (55,3)	Видимых нарушений структуры бетона не выявлено

Примечание. В скобках указаны данные по определению прочности бетонов по ГОСТ 10180-90 [16].

Таблица 5

Основные результаты определения самоупреждения бетонов по методике [15] при хранении образцов в воде

Маркировка бетонных образцов	Самоупреждение по методике [15] при хранении в изолированных условиях				Состояние призм в кондукторах
	максимальное		в конце наблюдений		
	возраст, сут.	значение, МПа	возраст, сут.	значение, МПа	
НБ1	9	2,70	50	—	Явное разрушение структуры с отделением крупного заполнителя от цементно-песчаной матрицы
НБ2	4,8	1,47	50	0,58	Нарушение геометрии «разбухание», образование продольных трещин на гранях с шириной раскрытия до 1 мм и глубиной до 10 мм
НБ3	15,9	3,36	50	3,41	Образование продольных трещин на гранях с шириной раскрытия до 0,5 мм и глубиной до 5 мм

Примечание. Образцы из бетонов НБ1, НБ2 и НБ3 помещались в воду в возрасте 1,2; 1,9 и 1,8 суток при прочности на сжатие по ГОСТ 10180-90 [16] 10,6; 7,2 и 10,1 МПа соответственно.

Общий вид разрушения бетонных призм из бетонов НБ, НБ2 и НБ3 в динамометрических кондукторах, хранившихся в воде, представлен на рисунке 4.

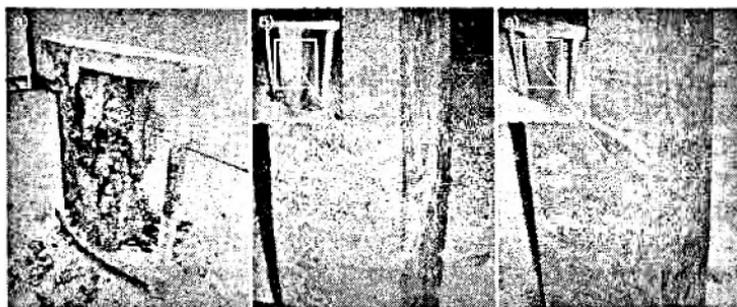


Рис. 4. Общий вид разрушения бетонных призм в динамометрических кондукторах, хранившихся в воде:
 а – характерное разрушение призм из бетона НБ1;
 б – характерное разрушение призм из бетона НБ2;
 а – характерное разрушение призм из бетона НБ3

В данной работе исследованы собственные деформации трубобетонных элементов на основе бетона НБ1, показавшего максимальную энергоактивность в изолированных условиях при одноосном упругом ограничении (см. рис. 2 и табл. 4). Экспериментальная серия включает 9 образцов (по три «образца-близнеца» для каждой толщины стенки, см. табл. 6).

Таблица 6

Основные характеристики экспериментальных образцов

Номер серии	Марка образца	Размеры, мм	Марка напрягающего бетона
I	СНСТБЭ.200.1-1	$\varnothing 200; t = 1; l = 600$	НБ1
	СНСТБЭ.200.1-2	$\varnothing 200; t = 1; l = 600$	
	СНСТБЭ.200.1-3	$\varnothing 200; t = 1; l = 600$	
II	СНСТБЭ.200.1,5-1	$\varnothing 200; t = 1,5; l = 600$	НБ1
	СНСТБЭ.200.1,5-2	$\varnothing 200; t = 1,5; l = 600$	
	СНСТБЭ.200.1,5-3	$\varnothing 200; t = 1,5; l = 600$	
III	СНСТБЭ.200.2-1	$\varnothing 200; t = 2; l = 600$	НБ1
	СНСТБЭ.200.2-2	$\varnothing 200; t = 2; l = 600$	
	СНСТБЭ.200.2-3	$\varnothing 200; t = 2; l = 600$	

Использование суперпластификатора поликарбоксилатного типа позволило отказаться от дополнительного уплотнения бетонной смеси при бетонировании сталетрубобетонных элементов, при этом расплыв конуса

по СТБ 1544-2005 [18] составил 86 см, что соответствует марке бетонной смеси по удобоукладываемости РК-6.

Для измерения продольных и тангенциальных деформаций оболочек сталетрубобетонных элементов на стадии расширения напрягающего бетона использовались тензорезисторы с базой 20 мм, наклеенные в соответствующих направлениях. По высоте элементов тензорезисторы наклеивались в трех уровнях – по центру и на расстоянии 100 мм от торцов, а в поперечном направлении – через 120°. Таким образом, деформации образца измерялись с помощью 18 тензорезисторов (по 9 тензорезисторов для каждого из направлений) (см. рис. 5, б).

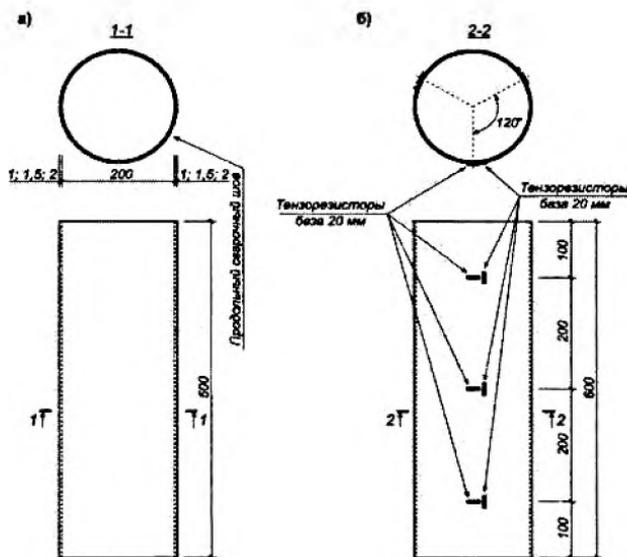


Рис. 5. Стальные оболочки для изготовления самоупреженных сталетрубобетонных элементов:
 а – геометрические параметры оболочек;
 б – схема расположения тензорезисторов на поверхности оболочек

По экспериментально измеренным продольным и тангенциальным деформациям оболочки сталетрубобетонного элемента с помощью обобщенного закона Гука вычислялись напряжения в оболочке по соответствующим направлениям:

$$\sigma_{x,\theta} = \frac{E_s}{1-\nu_s^2} (\epsilon_{x,\theta} + \nu_s \epsilon_{s,2}), \quad (1)$$

$$\sigma_{s,z} = \frac{E_s}{1 - \nu_s^2} (\epsilon_{s,z} + \nu_s \epsilon_{s,\theta}), \quad (2)$$

где $\sigma_{s,\theta}$, $\sigma_{s,z}$ – тангенциальные и продольные напряжения в оболочке соответственно; $\epsilon_{s,\theta}$, $\epsilon_{s,z}$ – тангенциальные и продольные относительные деформации оболочки соответственно; E_s , ν_s – модуль упругости и коэффициент Пуассона стали соответственно.

Затем, учитывая коэффициенты армирования, а также предполагая равенство тангенциальных и радиальных напряжений в бетоне, определялись напряжения в ядре элемента по формулам

$$\sigma_{CE,\rho} = \sigma_{s,\theta} \cdot \rho_\rho, \quad (3)$$

$$\sigma_{CE,z} = \sigma_{s,z} \cdot \rho_z, \quad (4)$$

где $\sigma_{CE,\rho}$, $\sigma_{CE,z}$ – радиальные и продольные напряжения в бетонном ядре.

Графическая интерпретация экспериментальных данных по определению тангенциальных и осевых (продольных) относительных деформаций и вычисленных по ним соответствующих напряжений в сталетрубобетонных элементах на напрягающем бетоне приведена на рисунках 6 – 8.

Таким образом, в результате экспериментальных исследований средние радиальные $\sigma_{CE,\rho}$ и осевые $\sigma_{CE,z}$ (продольные) напряжения сжатия в бетоне самоупрежженных сталетрубобетонных элементов достигли следующих значений:

– в элементах серии I с толщиной стенки оболочки $t_s = 1$ мм ($\rho_\rho = 1\%$, $\rho_z = 2\%$) $\sigma_{CE,\rho} = 4,83$ МПа, $\sigma_{CE,z} = 5,27$ МПа;

– в элементах серии II с толщиной стенки оболочки $t_s = 1,5$ мм ($\rho_\rho = 1,5\%$, $\rho_z = 3\%$) $\sigma_{CE,\rho} = 6,23$ МПа, $\sigma_{CE,z} = 5,97$ МПа;

– в элементах серии III с толщиной стенки оболочки $t_s = 2$ мм ($\rho_\rho = 2\%$, $\rho_z = 4\%$) $\sigma_{CE,\rho} = 7,57$ МПа, $\sigma_{CE,z} = 7,13$ МПа.

Величина самоупрежжения бетона НБ1, использованного для изготовления опытных образцов, по самоупрежжению, определенная в условиях одноосного стандартного ограничения (1%), но при хранении в изолированных условиях (моделирующих условия твердения бетона в трубе), составила $\sigma_{CE} = 2,4$ МПа (см. рис. 2 и табл. 5).

По величине самоупрежжения бетона был выполнен расчет самоупрежжения бетонного ядра элементов серий I-III по мультипликативной зависимости [19].

Для элементов с толщиной стенки оболочки 1; 1,5; 2 мм самонапряжение ядра в радиальном и продольном направлениях соответственно составило 3,6 и 3,98 МПа; 3,84 и 4,14 МПа; 3,98 и 4,22 МПа.

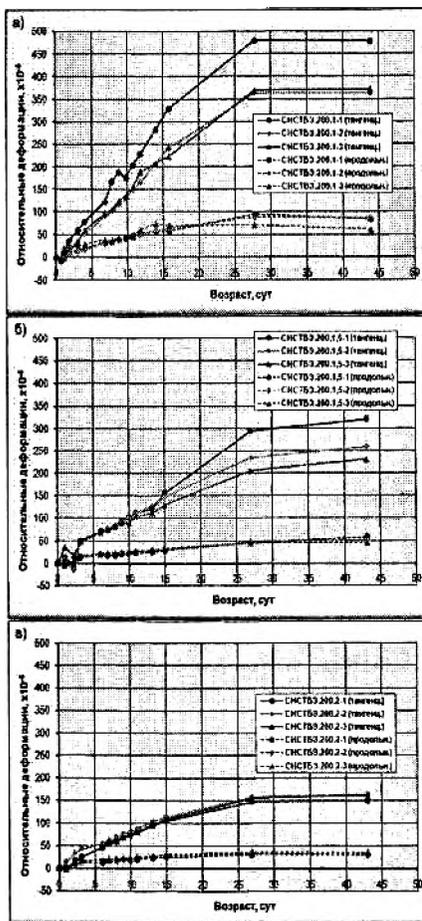


Рис. 6. Тангенциальные и осевые (продольные) относительные деформации оболочек сталежелезобетонных элементов: а – при толщине стенки оболочки 1 мм; б – при толщине стенки оболочки 1,5 мм; в – при толщине стенки оболочки 2 мм

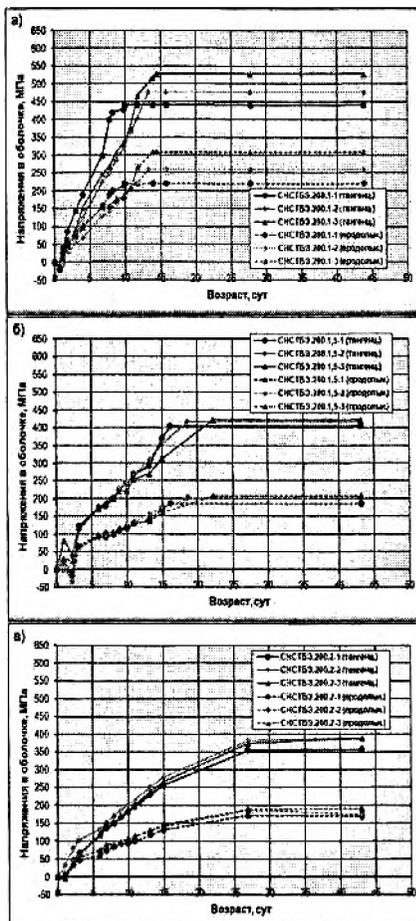


Рис. 7. Тангенциальные и осевые (продольные) напряжения в оболочках сталежелезобетонных элементов: а – при толщине стенки оболочки 1 мм; б – при толщине стенки оболочки 1,5 мм; в – при толщине стенки оболочки 2 мм

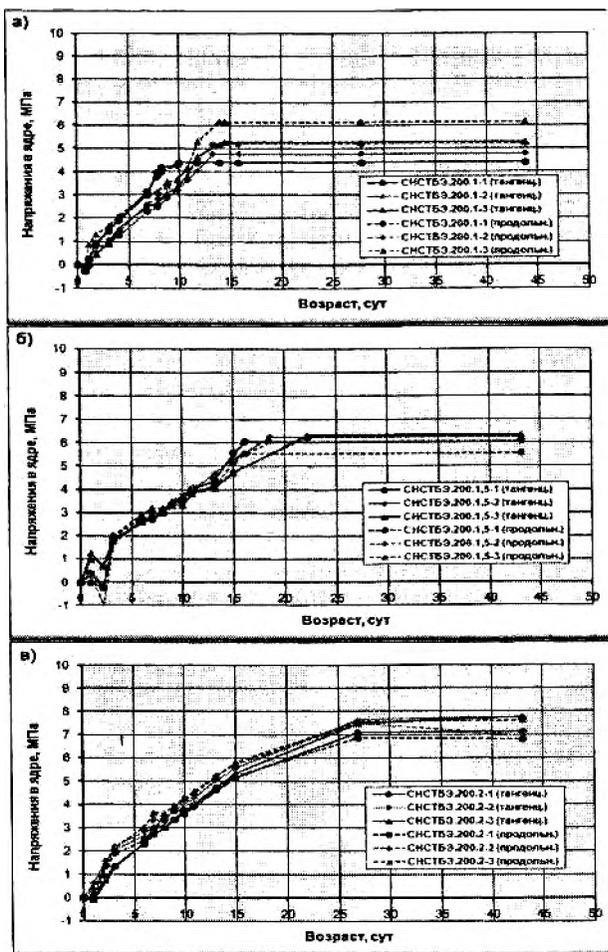


Рис. 8. Тангенциальные и осевые (продольные) напряжения в ядрах сталетрубобетонных элементов:

а – при толщине стенки оболочки 1 мм; б – при толщине стенки оболочки 1,5 мм; в – при толщине стенки оболочки 2 мм

Заключение

Выполненные экспериментальные исследования свидетельствуют об эффективности применения комплексной расширяющейся добавки для получения самоупроченных сталетрубобетонных элементов. При этом возможно получать необходимую величину самоупроченности бетона ядра, варьируя количественный состав напрягающего цемента и его расход.

Применение комплексной расширяющейся добавки позволило решить основную проблему использования классических напрягающих цементов и бетонов на их основе в трубобетоне – рост собственных деформаций в условиях изоляции без доступа дополнительной свободной воды в процессе гидратации, необходимой для перекристаллизации моносульфата в этtringит.

Значения самонапряжения рассчитанные по мультипликативной зависимости [19] значительно занижены в сравнении с экспериментально полученными значениями самонапряжения бетонного ядра сталетрубобетонных элементов. Это может объясняться тем, что условия хранения образцов из напрягающего бетона при определении базовой характеристики – величины самонапряжения (см. табл. 6), необходимой для расчета самонапряжения бетона в конструкции, отличались от стандартных условий [19] – хранение образцов после набора бетоном прочности 8 – 15 МПа в воде или обильно влажном состоянии. Однако при водном хранении образцов, вследствие высокой энергоактивности составов, происходило разрушение структуры напрягающего бетона (см. табл. 6).

Таким образом, в связи с изолированными условиями твердения напрягающего бетона в условиях объемного ограничения стальной оболочкой трубобетонного элемента, а также вследствие необходимости достижения высокой энергии расширения таких составов, необходима корректировка методик определения базовых характеристик напрягающего бетона [15; 19], а также напрягающего цемента [20]. Это в свою очередь требует пересмотра зависимостей [19; 6] по прогнозированию самонапряжения бетона в конструкции в условиях объемного ограничения и внесения в ТНПА альтернативных методик определения прочностных характеристик и величин самонапряжения в условиях, аналогичных работе конструктивного элемента, т.е. в условиях объемного ограничения.

Литература

1. Красильников, К.Г. Физико-химия собственных деформаций цементного камня / К.Г. Красильников, Л.В. Никитина, Н.Н. Скоблинская. – М.: Стройиздат, 1980.
2. Кузнецова, Т.В. Алюминатные и сульфоалюминатные цементы / Т.В. Кузнецова. – М.: Стройиздат, 1986.
3. Кузнецова, Т. В. Структура и свойства расширяющихся и напрягающих цементов / Т.В. Кузнецова // Ресурсосберегающие технологии железобетонных конструкций на основе напрягающих цементов: сб. докл. всесоюз. конф. в г. Грозном. – М.: Стройиздат, 1989. – С. 8 – 9.

4. Михайлов, В.В. Расширяющийся и напрягающий цементы и самоупра-
жненные железобетонные конструкции / В.В. Михайлов, С.Л. Литвер. – М.:
Стройиздат, 1974. – 312 с.
5. Михайлов, В.В. Предварительно напряженные железобетонные конст-
рукции / В.В. Михайлов. – М.: Стройиздат, 1978.
6. Тур, В.В. Экспериментально-теоретические основы предварительного
напряжения конструкций при применении напрягающего бетона
/ В.В. Тур. – Изд-во БПИ, 1997. – 276 с.
7. Протьюко, Н.С. Свойства и особенности применения расширяющей до-
бавки РСАМ в технологии бетона и растворов / Н.С. Протьюко // Строи-
тельная наука и техника. – 2007. – № 5. – С. 123 – 130.
8. Рекомендации по проектированию составов бетонов с компенсирован-
ной усадкой или самоупражением. – Брест: БГТУ, 2005. – 13 с.
9. Design Guide for SHS Concrete-Filled Columns. – Corus Tubes, 2002.
10. Батраков, В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика
/ В.Г. Батраков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М., 1998. – 768 с.
11. Ратинов, В.Б. Добавки в бетон / В.Б. Ратинов, Т.И. Розенберг. – М.:
Стройиздат, 1989. – 215 с.
12. Тур, В. В. Самонапряженный железобетон: исследование, опыт и пер-
спективы применения / В.В. Тур // Строительная наука и техника. –
2005. – № 1. – С. 62 – 69.
13. G. Xu, Beaudion J.J. Effect of Polycarboxylate Superplasticizer on Contribu-
tion of Internal Transition Zone of Electrical Conductivity of Portland Cement
Mortar // ACI Material Journal. – 2000. – V. 97, № 4. – P. 418 – 424.
14. Калиновская, Н.Н. Технологические свойства, прочность и эффективное
применение бетона, модифицированного гиперпластификатором ГП-1
/ Н.Н. Калиновская // Строительная наука и техника. – 2007. – № 5. – С. 74 – 83.
15. СТБ 2101-2010. Бетоны напрягающие. Технические условия. – Минск:
Минскройстройархитектуры РБ, 2010. – 19 с.
16. ГОСТ 10180-90. Бетоны. Методы определения прочности по контроль-
ным образцам. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 41 с.
17. ГОСТ 10704-91. Трубы стальные электросварные прямошовные. Сор-
тамент. – М.: Издательство стандартов, 1991. – 7 с.
18. Бетоны конструкционные тяжелые. Технические условия: СТБ 1544-2005. –
Минск: Минстройархитектуры Респ. Беларусь, 2005. – 17 с.
19. Пособие по проектированию самоупраженных железобетонных конст-
рукций (к СНиП 2.03.01-84 «Бетонные и железобетонные конструк-
ции») / НИИЖБ Госстроя СССР и ЦНИИпромзданий Госстроя СССР. –
М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 64 с.
20. Цемент напрягающий. Технические условия СТБ 1335-2002. – Минск:
Минстройархитектуры Респ. Беларусь, 2002. – 11 с.