

Издается с апреля 1955 г.

Учредители:  
НИИЖБ, ВНИИжелезобетон

## СОДЕРЖАНИЕ

### БЕТОНЫ

- ТОТУРБИЕВ А.Б.* Карбидкремниевый жаростойкий бетон с низкой окисляемостью ..... 2
- ИЗОТОВ В.С., ИБРАГИМОВ Р.А.* Сравнение эффективности отечественных гиперпластификаторов в тяжелом бетоне ..... 4

### СТРОИТЕЛЬНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

- ТИМОФЕЕВ Ю.Л.* Совершенствование технологии монтажа одноэтажных промышленных зданий из сборных железобетонных конструкций с элементами автоматизации технологических процессов ..... 6
- КОРЕВИЦКАЯ М.Г., ИВАНОВ С.И., СОКУРОВ А.З., ДИКИНОВ М.М.* Опыт мониторинга возведения зданий ..... 9

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ

- ЧУЛКОВА И.Л., КУЗНЕЦОВ С.М.* Оценка эффективности использования золы при производстве железобетонных конструкций ..... 13
- РАХИМОВА Н.Р., РАХИМОВ Р.З.* Свойства шлакощелочных бетонов в зависимости от состава и дисперсности вяжущего на основе нейтрального доменного шлака ..... 16

### ДОЛГОВЕЧНОСТЬ

- БОЙКО В.Г., КАЛУГИН С.Ю., САМОХВАЛОВА В.Б., ШЕВЧЕНКО В.В.* Определение конкретных значений морозостойкости бетона при испытаниях базовыми методами ГОСТ 10060.0-10060.2-95 ..... 19

### ТЕОРИЯ

- НАЗАРЕНКО В.Г., ТВОРОГОВА М.Н., ЛУКАНЦОВ П.Н.* О построении функций старения бетона ..... 23

### В ПОРЯДКЕ ОБСУЖДЕНИЯ

- ДВОРКИН Л.И., ДВОРКИН О.Л.* Анализ основных положений закона створа теории ИСК ..... 25

### СТАНДАРТЫ И НОРМАТИВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ

- ШЕЙНИН А.М., ЭККЕЛЬ С.В.* О нормативных требованиях к бетону дорожных и аэродромных покрытий (к пересмотру ГОСТ 26633-91) ..... 28

А.Б. ТОТУРБИЕВ, канд. техн. наук

## КАРБИДКРЕМНИЕВЫЙ ЖАРОСТОЙКИЙ БЕТОН С НИЗКОЙ ОКИСЛЯЕМОСТЬЮ

Известно, что карбидкремниевые изделия характеризуются высокой огнеупорностью (температура диссоциации 2800°C), высокой температурой деформации под удельной нагрузкой (1760-1850°C), низким коэффициентом термического расширения, высокой теплопроводностью ( $\lambda_{cp}$  в 5-10 раз выше теплопроводности других огнеупоров), весьма высокой прочностью, в 10-12 раз превышающей прочность шамотных огнеупоров. Все эти свойства делают этот материал термически устойчивым и, следовательно, более долговечным по сравнению с другими огнеупорными материалами, особенно в конструкциях, подверженных циклическим температурным воздействиям.

Однако карбид кремния подвержен окислению, особенно при температуре выше 1200°C, что существенно снижает его долговечность. С этим недостатком борются, применяя различные технологические приемы: покрытие поверхности изделий химически устойчивыми веществами, введение в состав материала различных добавок, образующих на зернах карбида кремния газонепроницаемые пленки, предотвращающие или замедляющие процесс окисления  $SiC$ . Исследованию предотвращения или снижения интенсивности окисляемости карборунда посвящено достаточно много работ. Однако этот вопрос в связи с многогранностью влияния применяемых минеральных добавок и самой среды решен не до конца.

С целью снижения интенсивности окисления карбида кремния, по данным работы [1], следует вводить добавку в виде  $CaO$  в количестве 1,4 % по массе, которая вначале интенсифицирует процесс окисления, а затем существенно его замедляет и делает менее интенсивным, чем в случае применения карборунда без добавок. Значительный интерес представляют данные, приведенные в той же работе, о влиянии некоторых стекловидных веществ на окисляемость карборунда. В частности, указывается, что по мере насыщения стекол кремнеземом существенно замедляется процесс окисления карборунда при температурах 1200-1300°C. Это явление авторы связывают с уменьшением подвижности кислорода по мере возрастания кремнеземистого модуля. При этом отмечается, что окисление связано со значительным увеличением объема, что позволяет предположить образование сплошных пленок на зернах карбида кремния. Пленка может быть чисто кремнеземистой, и в этом случае она при высоких температурах кристобалитовая. Если же в системе присутствуют оксиды, то пленка – силикатная.

Защитное действие силикатных пленок зависит от кристаллизационной способности того или иного силиката, близости коэффициентов термического расширения карбида кремния и пленки, угла смачивания и т.д. Исследования карбидкремниевых материалов показали [2], что основное условие устойчивости  $SiC$  против окисления – защитная пленка  $SiO_2$ . Она служит диффузионным барьером, лимитирующим скорость взаимодействия карбида кремния с газами – окислителями.

С целью определения возможности совместной работы силиката натрия и карборунда при высоких температурах был проведен комплекс исследований по выявлению физико-химических процессов, протекающих в системе  $SiC + Na_2O \cdot SiO_2$  [3]. Рассмотрены физико-химические процессы, происходящие в системе "карбид кремния – силикат натрия – вода". Композиция готовилась путем совместного помола карборунда и силикат-глыбы, взятых в соотношении 85:15 (% по массе).

Несмотря на более высокие показатели жаростойкого карбидкремниевых бетона на карбидкремнийсиликатнатриевом композиционном вяжущем (см. таблицу), высокое содержание в нем щелочного компонента ( $Na_2O$ ) существенно снижает эффективность применения такого высокоогнеупорного материала, как карбид кремния. Кроме того, ему свойственна еще достаточно высокая окисляемость, что снижает его долговечность. В связи с этим представляет интерес поиск возможности получения пленки на карбидкремниевых частицах, способной не только создать равновесие при высоких температурах на границах "пленка- $SiC$ " и "пленка-среда", но и уменьшить окисляемость исходного карбидкремния.

Исходя из вышеизложенного, нами было сделано предположение о возможности образования защитной пленки с высоким содержанием  $SiO_2$  вокруг зерен карбидкремния при использовании в качестве связки полисиликатов натрия. С этой целью карбидкремниевый бетон был изготовлен из полисиликатнатриевого композиционного вяжущего с использованием нижеприведенных компонентов.

Полисиликат натрия с кремнеземистым модулем 6-6,5 ( $SiO_2:Na_2O$ ) получали путем введения в 20-30%-ный водный раствор силиката натрия 10-16% гидрозоля диоксида кремния в соотношении 1:(1-1,5) соответственно, с последующей выдержкой не более 0,5 ч [4].

Карбид кремния марки 54С Лужского абразивного завода, плотностью 3,2 г/см<sup>3</sup>, следующего хими-

Показатели свойств	Бетон на композиционном вяжущем	
	силикатнатриевом	полисиликатнатриевом
Максимальная температура применения при одностороннем нагреве, °C	1600	1750
Предел прочности при сжатии после сушки при 200°C, МПа	35-40	25-30
Средняя плотность после сушки при 200°C, г/см³	2,3-2,5	2,5-2,7
Открытая пористость после сушки при 200°C, %	19-20	17-19
Линейная усадка после обжига до максимальной температуры применения, %	+0,24	+0,13
Теплопроводность при температуре 1200°C, Вт/(м·К)	12,5	11,9
Температура начала размягчения под нагрузкой 0,2 МПа, °C	1550	1680
Термостойкость (число водяных теплосмен после термообработки при 1300°C)	50	>70

ческого состава, %:  $SiC - 96,21$ ;  $Si_{св} - 0,4$ ;  $C_{св} - 0,13$ ;  $(Fe + Al) - 1,05$ ;  $CaO - 0,6$ ;  $SiO_2 - 0,94$ .

Карбидкремниевую бетонную смесь состава, % масс.: 80 (карбидкремниевый наполнитель): 18 (тонко-молотый карбид кремния): 2 (водный раствор полисиликата натрия) готовили в следующей последовательности. Тонкоизмельченный до  $S_{уд} = 2500-3000 \text{ см}^2/\text{г}$  карбид кремния смешивали с водным раствором полисиликата натрия в скоростной лабораторной мешалке до получения суспензии карбидкремниевое полисиликатнатриевого композиционного вяжущего. Затем в полученную суспензию вводили мелкозернистый карбидкремниевый наполнитель и перемешивали в течение 3-4 мин до получения однородной массы бетона.

Основные сравнительные показатели свойств жаростойкого карбидкремниевое бетона на силикатнатриевом и полисиликатнатриевом композиционном вяжущем, приведенные в таблице, свидетельствуют, что бетон на полисиликатнатриевом вяжущем имеет значительно более высокие показатели термостойкости, температуры начала деформации под нагрузкой 0,2 МПа и водостойкости. Это объясняется тем, что при использовании в качестве связующего полисиликата натрия взамен силиката натрия в бетоне снижается содержание щелочного оксида ( $Na_2O$ ) – легкоплавкого составляющего при одновременном повышении кремнеземистого составляющего ( $SiO_2$ ), способствующего образованию силикатной пленки вокруг зерен карбида кремния и соответственно уменьшению интенсивности процесса окисления. Это подтверждается также результатами рентгеноструктурного анализа полисиликатнатриевого композиционного вяжущего.

В изучаемой композиции защитная пленка образуется на карбидкремниевых частицах уже до температур окисления, что подтверждается увеличением интенсивности линий  $d\text{\AA}$  (3,35) кварца. При этом интенсивность линий  $d\text{\AA}$  (4,09) кристобалита остается неизменной. На рентгенограмме образца вяжущего, нагретого до 1400°C, содержание кристобалита растет, а интенсивность линий  $d\text{\AA}$  (3,35) кварца уменьшается.

В данном случае возможность снижения окисления в карбидкремниевом бетоне при введении карбидкремнийполисиликатнатриевого композиционного

вяжущего косвенно подтверждается изменением его прочностных свойств в нагретом состоянии. Например, образец карбидкремниевое жаростойкого бетона на основе карбидкремниевое силикатнатриевого композиционного вяжущего аналогичного состава при 1450°C (в нагретом состоянии) имел прочность 1-1,2 МПа, тогда как бетон на полисиликатнатриевом композиционном вяжущем при аналогичной температуре характеризовался прочностью 5 МПа (рис. 1).

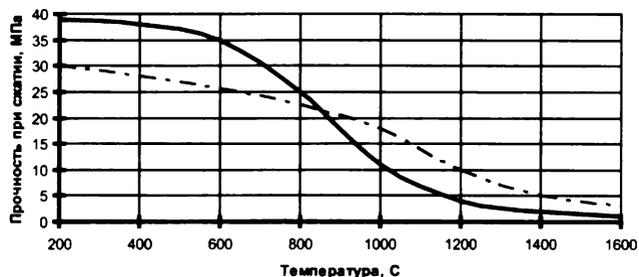


Рис. 1. Зависимость прочности нагретых образцов жаростойкого карбидкремниевое бетона от температуры:

— - Бетон на карбидкремнийсиликатнатриевом композиционном вяжущем; - - - - Бетон на карбидкремнийполисиликатнатриевом композиционном вяжущем

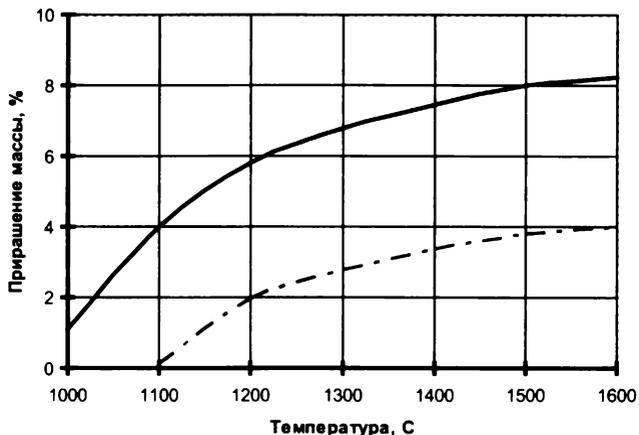


Рис. 2. Влияние температуры на окисляемость карбидкремниевое бетона:

— - Бетон на карбидкремнийсиликатнатриевом композиционном вяжущем; - - - - Бетон на карбидкремнийполисиликатнатриевом композиционном вяжущем

На рис. 2 показано влияние температуры на окисляемость карбидкремниевое бетона на карбидкремнийсиликатнатриевом и полисиликатнатриевом

композиционных вяжущих. Так, бетон на первом из них характеризует ранняя окисляемость, примерно с 800°C, связанная с прибавлением массы, а при нагревании до 1600°C увеличение достигает 8-9%. А между тем окислительные свойства карбидкремниевое бетона на основе второго вяжущего проявляются заметно позже (при температуре 1100-1200°C), а прибавление массы идет плавно, достигая только 3% при нагревании до 1600°C.

Таким образом, в результате проведенных исследований разработан высокоогнеупорный бетон с низкой окисляемостью на карбидкремнийполисиликатнатриевом композиционном вяжущем. Комплексные физико-химические, термомеханические и другие исследования подтвердили возможность образования защитной пленки с высоким содержанием SiO<sub>2</sub> вокруг зерен карбида кремния при использовании в качестве связующего водного раствора полисиликата натрия, способствующего уменьшению процесса окисления карбидкремниевое бетона.

Научно-практические основы этих исследований заключаются в том, что полисиликатные растворы

содержат в своем составе, наряду с частицами золя, мономер, олигомеры и полимерные разновидности кремнезема, которые способствуют проявлению высокой реакционной способности последнего в составе различных композиций. Поэтому формирование омоноличивающих новообразований в структуре карбидкремниевое бетона из полисиликатов натрия принципиально отличается от образования связующей пленки силиката натрия (силикат-глыбы) и характеризуется высокой водостойкостью, термостойкостью и температурой применения из-за низкого содержания щелочного компонента – легкоплавкого составляющего в вяжущем.

## Библиографический список

1. Кайнарский И.С., Дегтяров Э.В. Карборундовые огнеупоры. - Харьков: Metallurgizdat, 1963. - 252 с.
2. Гнесин Г.Г. Карбид-кремниевые материалы. - М.: Metallurgia, 1977. - 216 с.
3. Тотурбиев Б.Д. Строительные материалы на основе силикатнатриевых композиций. - М.: Стройиздат, 1988. - 208 с.
4. Патент РФ №2124475, 1999.

*В.С. ИЗОТОВ, д-р техн. наук, Р.А. ИБРАГИМОВ, асп. (Казанский государственный архитектурно-строительный ун-т)*

## СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ГИПЕРПЛАСТИФИКАТОРОВ В ТЯЖЕЛОМ БЕТОНЕ

Основные пути повышения качества бетона и долговечности железобетонных конструкций заключаются в использовании высокотехнологичного оборудования, современных технологий производства, применении качественных материалов и добавок индивидуального и полифункционального действия. Использование последних является весьма эффективным и экономичным способом улучшения технологических и физико-механических свойств бетона [1]. Из добавок, нашедших наиболее широкое применение в производстве бетона и железобетона, на первом месте стоят пластифицирующие добавки.

В последнее время стали применяться у нас и в особенности за рубежом высокоэффективные пластифицирующие добавки на основе эфиров поликарбоксилата, которые получили название гиперпластификаторов. Они отличаются от известных суперпластификаторов, например С-3, более высоким водоредуцирующим эффектом, приводящим к существенному повышению плотности и прочности бетона [2].

К отечественным новым гиперпластификаторам на поликарбоксилатной основе, появившимся на рынке добавок для бетонов, относят: "Мобет марки 2", "Антигидрон марки 5", "Одолит-К", "Одолит-Т".

"Мобет марки 2" – модификатор бетона и строительных растворов, предназначенный для получе-

ния высококачественных, высокопрочных, самоуплотняющихся, морозостойких бетонов и самовыравнивающихся строительных растворов. Он представляет собой жидкость от бесцветного до темно-коричневого цвета, соответствует требованиям ГОСТ 24211-2003, не содержит компонентов, способствующих коррозии арматуры. Рекомендуемый расход добавки 0,5-1,5% от массы цемента.

"Антигидрон марки 5" ("Жидкий гиперконцентрат") – жидкая добавка для бетона и цементно-песчаных смесей уплотняющего и пластифицирующего водоредуцирующего действия, полностью растворима в воде. Отсутствие хлора позволяет использовать ее для армированных бетонов. Рекомендуемый расход добавки 1-1,5% от массы цемента.

Гиперпластификаторы "Одолит-К" и "Одолит-Т" представляют собой высокоэффективный концентрат пластификатора 1-й группы с ускоряющим и самоуплотняющим действием на основе специальных карбоксилатов, без содержания солей. Рекомендуемая дозировка добавки "Одолит-К" – 1%, "Одолит-Т" – 1-2% по жидкому веществу от массы цемента.

Для исследования влияния добавок на свойства цементного теста и физико-механические показатели тяжелого бетона использован портландцемент ПЦ400-Д20 Вольского завода, состав которого приведен в табл.1.

Таблица 1

Процентное содержание главных окислов				Содержание основных минералов				Содержание добавок, %	
$SiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	$CaO$	$C_3S$	$C_2S$	$C_3A$	$C_4AF$	Опока	$SO_3$
22,55	4,75	4,7	65,04	57	21	4,6	14	8	2,2

Результаты исследований влияния добавок на нормальную густоту цементного теста и сроки схватывания приведены в табл. 2.

Таблица 2

№ п/п	Содержание добавок, %				Нормальная густота цементного теста, %	Сроки схватывания, мин	
	Мобет-2	Антигидрон-5	Одолит-К	Одолит-Т		начало	конец
1	–	–	–	–	0,26	155	295
2	0,6	–	–	–	0,2175	231	366
3	0,8	–	–	–	0,21	248	392
4	1	–	–	–	0,2	256	403
5	1,2	–	–	–	0,1925	269	415
6	1,4	–	–	–	0,1875	291	433
7	–	0,6	–	–	0,235	210	325
8	–	0,8	–	–	0,2275	228	342
9	–	1	–	–	0,2225	244	368
10	–	1,2	–	–	0,22	258	390
11	–	1,4	–	–	0,2175	276	405
12	–	–	0,6	–	0,2175	229	361
13	–	–	0,8	–	0,21	245	395
14	–	–	1	–	0,2	259	409
15	–	–	1,2	–	0,1925	266	417
16	–	–	1,4	–	0,1875	290	435
17	–	–	–	0,6	0,235	208	322
18	–	–	–	0,8	0,2275	225	340
19	–	–	–	1	0,2225	248	371
20	–	–	–	1,2	0,22	262	395
21	–	–	–	1,3	0,2185	281	413

Из данных табл. 2 видно, что наибольшим водоредуцирующим действием обладают добавки "Мобет-2" и "Одолит-К" при дозировке 1,4 % от массы цемента. Наименьшим – добавка "Одолит-Т" при дозировке 1,3% .

Все добавки замедляют процесс начала и конца схватывания цементного теста, при этом наибольшим влиянием на начало схватывания обладает добавка "Мобет-2" при дозировке 1,4%, а на конец схватывания – добавка "Одолит-К" при дозировке 1,4% от массы цемента.

Изучено влияние добавок на физико-механические свойства тяжелого бетона нормального твердения в возрасте 1, 3, 7 и 28 сут. Для эксперимента принят производственный состав бетонной смеси марки М350 с осадкой конуса 8-9 см ( $\rho = 450 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho = 595 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho = 1140 \text{ кг/м}^3$ ). Заполнителями служили обогащен-

ный песок Камского месторождения с модулем крупности 2,7, щебень из гравия Камского месторождения фракции 5-20 мм. Воду добавляли в бетонную смесь до достижения равной подвижности по ГОСТ 7473-94 [3].

Содержание добавок в бетонных смесях составило: "Мобет-2" – 1,2%, "С-3" – 0,8%, "Одолит-К" – 1%, "Одолит-Т" – 1,3%, "Антигидрон-5" – 1,2% от массы цемента. Добавки вводили в растворную смесь с водой затворения. Водоцементное отношение состава без добавки равнялось 0,46, с добавкой "Мобет-2", "Одолит-К" – 0,33, с добавкой "С-3" – 0,39, а с добавкой "Одолит-Т" и "Антигидрон-5" – 0,35.

Контрольные образцы (кубы с размером ребра 10 см) сразу после изготовления помещали в камеру нормального хранения и испытывали через 1, 3, 7 и 28 сут.

Результаты испытаний приведены в табл. 3.

Таблица 3

№ п/п	Содержание добавок, %					Средняя плотность бет. смеси, кг/м <sup>3</sup>	Прочность при сжатии (МПа) бетона в возрасте, сут			
	Мо-бет-2	Антигидрон-5	Одолит-К	Одолит-Т	С-3		1	3	7	28
1	–	–	–	–	–	2370	7,52* 100%	18,05* 100%	29,38* 100%	36,8* 100%
2	1,2	–	–	–	–	2475	12,41 165%	28,16 156%	44,36 151%	54,8 149%
3	–	1,2	–	–	–	2460	10,68 142%	25,09 139%	40,25 137%	47,84 130%
4	–	–	1	–	–	2475	12,56 167%	27,8 154%	44,07 150%	54,8 149%
5	–	–	–	1,3	–	2475	10,83 144%	25,27 140%	40,25 137%	48,57 132%
6	–	–	–	–	0,8	2460	9,78 130%	23,15 128%	37,4 127%	46,4 126%

Из приведенных в табл. 3 данных следует, что все изучаемые добавки повышают прочность бетона во все сроки твердения. Наибольший прирост прочности через сутки нормального твердения обеспечивается при введении добавки "Одолит-К" (на 67%), а через 3 сут – при введении добавки "Мобет-2" (на 56%). В указанные сроки при введении добавки С-3 прочность бетона повышается на 30-28%, а с добавками "Антигидрон-5", "Одолит-Т" – на 42-39 и 44-40% соответственно.

В возрасте 28 сут нормального твердения прочность при сжатии с добавками повышается с 36,8 до 54,8 МПа, т.е. на 49%. При этом наибольшее повышение прочности достигается при введении добавок "Мобет-2" и "Одолит-К" (на 49%). При введении добавки С-3 прочность повышается на 26%, а с добавками "Антигидрон-5", "Одолит-Т" – на 30 и 32% соответственно.

Таблица 4

№ п/п	Содержание добавок, %			Водонепроницаемость, марка
	Мобет-2	Антигидрон-5	Одолит-К	
1	–	–	–	W6
2	1,2			W12
3		1,2		W16
4			1	W16

Водонепроницаемость бетонных образцов-цилиндров размером 15×15 см определяли по ГОСТ 12730.5-84 (табл.4).

У образцов-цилиндров, модифицированных добавками "Антигидрон-5" и "Одолит-К", после выдерживания под давлением 1,6 МПа в течение 16 ч мокрое пятно на торцевой поверхности не появилось. В связи с этим марку по водонепроницаемости указанных образцов определяли по экспресс-контролю воздухопроницаемости бетона в соответствии с приложением 4 ГОСТ 12730.5-84 на приборе Агама-2РМ. Результаты испытаний приведены в табл. 5.

Таким образом, по результатам испытаний можно сделать следующие выводы.

Все изучаемые добавки обладают высокой водоредуцирующей способностью, при этом добавки "Мобет-2" и "Одолит-К" снижают водоцементное отношение на 29%, добавки "Антигидрон-5" и "Одолит-Т" – на

Таблица 5

№ п/п	Содержание добавок, %		Водонепроницаемость, марка	Сопротивление бетона прониканию воздуха, с/см <sup>3</sup>
	Антигидрон-5	Одолит-К		
1	1,2	–	20	140
2	–	1	16	57,1

24%, в то время как суперпластификатор С-3 только на 16%.

Высокий водоредуцирующий эффект приводит к повышению плотности, прочности и морозостойкости бетона. Прочность модифицированного бетона с добавками "Мобет-2" и "Одолит-К" в возрасте 28 сут нормального твердения повышается в 1,5 раза по сравнению с бетоном без добавок.

Водонепроницаемость бетона с новыми добавками возрастает от 3 до 7 ступеней. При этом водонепроницаемость бетона с добавкой "Мобет-2" возрастает на 3 ступени, с добавкой "Одолит-К" – на 5 ступеней, с добавкой "Антигидрон-5" – на 7 ступеней.

### Библиографический список

1. Баженов Ю.М. Технология бетона. - М.: АСВ, 2000. - 500 с.
2. Изотов В.С., Соколова Ю.А. Химические добавки для модификации бетона. М.: Издательство "Палеотип", 2006. - 243 с.
3. ГОСТ 7473-94. Смеси бетонные. Технические условия.

## СТРОИТЕЛЬНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

*Ю.Л. ТИМОФЕЕВ, д-р техн. наук, проф.*

### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ МОНТАЖА ОДНОЭТАЖНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗДАНИЙ ИЗ СБОРНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ЭЛЕМЕНТАМИ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Учитывая новую политику правительства страны на развитие промышленного производства, актуальным становится вопрос радикального совершенствования технологии монтажа одноэтажных производственных зданий из сборных железобетонных конструкций на основе разработки и внедрения в строительное производство элементов автоматизации трудоемких ручных процессов, обеспечивающих существенное снижение трудоемкости строительно-монтажных работ и значительное улучшение труда строительных рабочих.

В настоящей статье сделана попытка, рассмотреть некоторые пути решения указанных проблем. Альтернативой свободному методу монтажа является метод пространственной самофиксации монтажных элементов. Применение метода пространственной самофиксации позволяет свести до минимума количество необходимых монтажных приспособле-

ний, которые в ряде случаев можно назначать только для обеспечения устойчивости и точности установки базовых элементов. При этом появляется возможность сократить расход стали на монтажное оснащение и в соответствии с этим снизить его стоимость.

Для устранения сварных соединений железобетонных элементов каркаса здания предлагается заменить их на усовершенствованные самофиксирующиеся монтажные узлы, обеспечивающие в полном объеме внедрение метода пространственной самофиксации. В качестве такого соединения предложен унифицированный клеевой стык (рис.1), который обеспечивает соединение колонн с фундаментами стропильных и подстропильных ферм и балок с колоннами и т.д. Стык представляет собой полость цилиндрической формы 3 в монтируемой конструкции, стенки которой имеют периодический профиль. В

верхней части полости устраивается конусное сужение 8, в которой частично размещается капсула с клеем. В нижней части полость 3 имеет конусное расширение для размещения в нем уплотняющей манжеты 6 и облегчения монтажа конструкции. В опоре 2 при ее устройстве устанавливается закладная деталь в виде фиксирующего стержня 5 периодического профиля. Глубину анкерения фиксатора в опоре, его диаметр и свободную длину рассчитывают. Фиксатор на конце имеет острие. Диаметр полости принимается на 10 мм больше диаметра фиксатора для компенсации погрешностей при установке закладных и соединительных деталей в опорную часть фундамента и облегчения монтажа конструкции.

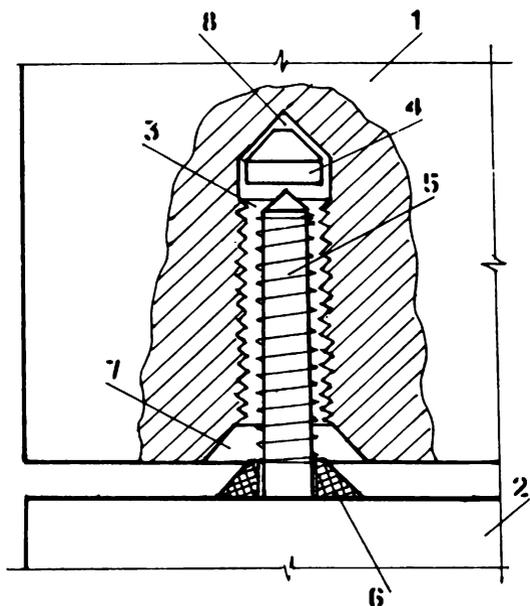


Рис. 1. Унифицированный клеевой монтажный стык для железобетонных конструкций

1 - монтируемая конструкция; 2 - опора; 3 - полость; 4 - капсула с клеем; 5 - фиксатор периодического профиля; 6 - герметизирующая манжета; 7 - нижнее конусное расширение полости; 8 - верхнее конусное сужение полости

Полость в монтируемой конструкции образуется путем установки при ее изготовлении закладной детали 3. Уплотняющая резиновая манжета, повторяющая профиль нижнего расширения полости, надевается на фиксатор. Капсула для клея предусмотрена из алюминиевой фольги, она изготавливается и заполняется клеевым составом в заводских условиях. В случае применения эпоксидных универсальных клеев типа ЭДП с отвердителем заполнение капсулы производится непосредственно перед монтажом конструкции, поэтому капсула должна иметь самогерметизирующуюся крышку. Размеры капсулы и полости для её размещения определяются расчетом. Для фиксации капсулы в полости она снабжена уплотнительным резиновым кольцом, которое упирается в буртики, исключающие смещение кольца при установке капсулы в полость.

Процесс монтажа и закрепления конструкции с применением клеевого стыка следующий. Перед подъемом конструкции в полость вставляется капсула с клеем, конструкция подается к месту монтажа и опускается на опору. При этом фиксатор 5 вводится в полость 3. Нижний конусный скос 7 играет роль ловителя и облегчает процедуру стыковки конструкций. При достижении острия фиксатора капсулы 4 происходит ее разгерметизация и под действием собственного веса монтируемой конструкции клей под давлением поступает в зазор между поверхностью фиксатора и стенками полости. Соотношение высоты нижнего уширения и верхней части полости обеспечивает герметизацию полости манжетой 6. При этом конусная часть (острие) фиксатора попадает в верхнюю конусную часть полости и обеспечивает самофиксацию конструкции в плане и по высоте.

Для оценки прочности клеевого соединения конструкций были проведены испытания опытных образцов, параметры которых приведены на рис. 2 и в таблице.

Параметры опытных образцов и результаты испытаний

№ п/п	$d_{me}$ , мм	$d_{\phi}$ , мм	$\Delta d$ , мм	$I_{an}$ , мм	$I_p$ , мм	$N_{np}$ , кН	Примечание
1	20	12	8	160	0	104	Разрушение по клеевому стыку
2	20	12	8	80	0	48	То же
3	20	16	4	160	0	120	Разрыв трубы
4	20	16	4	160	160	120	То же

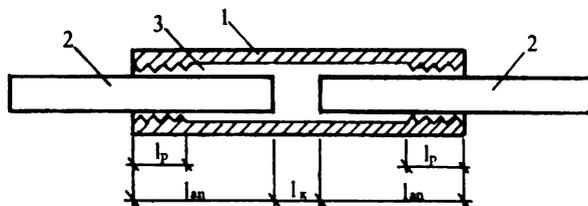


Рис. 2. Опытные образцы клеевого соединения сборных железобетонных конструкций

На рис. 2 и в таблице приведены следующие данные:

$d_{me}$  - внутренний диаметр полости (трубы);  $d_{\phi}$  - диаметр фиксатора (стержня);  $\Delta d$  - ширина кольцевого зазора между полостью и фиксатором;  $I_{an}$  - длина анкерения фиксатора в полости;  $I_p$  - длина резьбы в полости;  $N_{np}$  - предельная разрушающая продольная сила.

Опытные образцы клеевого соединения готовили следующим образом: полость трубы 1 (см. рис.2) частично заполняли эпоксидным клеем ЭДП. Затем в трубу вставляли фиксаторы 2 (стальной стержень периодического профиля). При этом обеспечивалось



## ОПЫТ МОНИТОРИНГА ВОЗВЕДЕНИЯ ЗДАНИЙ

Действующие нормативные документы в области мониторинга технического состояния зданий [1-4] регламентируют способы проведения мониторинга. Однако в этих документах крайне мало информации и рекомендаций по анализу полученных в результате мониторинга данных, выявлению критериев, свидетельствующих о нарушении нормальной (проектной) работы каркаса здания. Поэтому зачастую на основании данных мониторинга сложно принять решение о начале противоаварийных мероприятий, особенно в случае, если результаты мониторинга отличаются от обычных представлений о работе конструкций.

Для примера рассмотрим результаты мониторинга возведения высотных зданий, строящихся на участке № 9 "Москва-Сити", а именно - замеров деформаций наиболее нагруженных колонн каркасов башен "Москва" (75 надземных и 5 подземных этажей) и "Санкт Петербург" (64 надземных и 5 подземных этажей). Работа велась под руководством доктора технических наук, профессора, члена-корреспондента РААСН Клевцова Владимира Александровича.

Для измерений деформаций были выбраны наиболее нагруженные колонны в уровне низа здания. Основание под башнями – свайное. Применены сваи-стойки. Башни расположены на отдельно стоящих ростверках высотой 4,5 м (уровень В6), не связанных друг с другом и с ростверками стиловатных этажей, расположенных вокруг башен. Вид сборки представлен на рис. 1, вид башен в плане – на рис. 2 (здесь номерами выделены наиболее нагруженные колонны, для которых выполнялись замеры деформаций).

В башне "Москва" колонны сечением 2400×2100 мм, высотой 2,85 м армированы стержнями из 176Ø36AIII и 4Ø32AIII (площадь арматуры 1824см<sup>2</sup>), равномерно распределенными по сечению. В башне "Санкт-Петербург" колонны сечением 2100×2100 мм, высотой 2,85 м армированы стержнями из 172Ø36A500 и 4Ø32A500 (площадь арматуры 1783см<sup>2</sup>), также равномерно распределенными по сечению.

Деформации измерялись по четырем граням каждой колонны механическим (индикаторы часового типа с ценой деления 0,001 мм на базе измерений 280 мм) и тензометрическим (прибор фирмы "ТензоМ" с погрешностью 1 мкм на базе измерений 220 мм) методами (рис. 3). Всего было установлено 32 пары металлических реперов. Кроме того, были установлены 3 пары компенсационных реперов на ненагруженных конструкциях соседнего здания (для учета сезонных температурных деформаций).

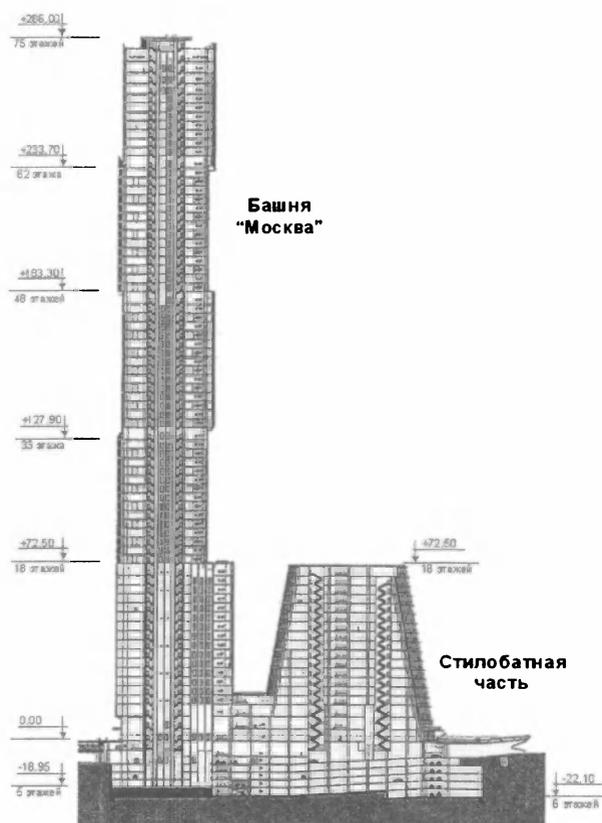


Рис. 1. Многофункциональный комплекс на участке № 9 "Москва – Сити". Разрез по башне "Москва"

К началу измерений были забетонированы перекрытие 10 этажа на отм. +41,25 башни "Москва" и перекрытие 16 этажа на отм. +63,75 башни "Санкт Петербург". Возраст бетона колонн, для которых замерялись деформации, составлял в среднем 330 сут. К моменту завершения измерений были забетонированы перекрытие 62 этажа на отм. +235,00 башни "Москва" и перекрытие 62 этажа на отм. +237,40 башни "Санкт-Петербург". Наблюдения за деформациями осуществлялись 454 сут.

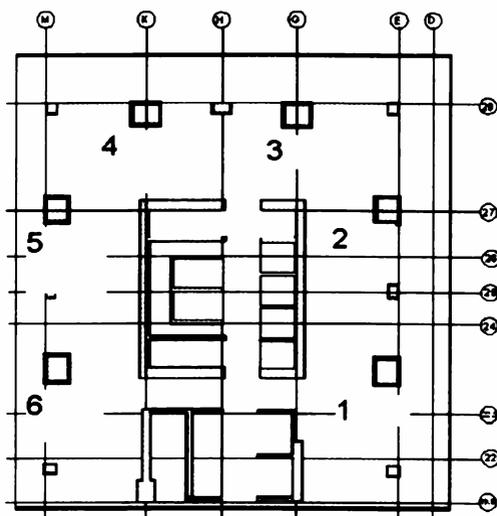
Следует отметить, что:

- примерно к середине периода наблюдений компенсационные репера были повреждены, что сделало невозможным учет температурных колебаний конструкций;

- к середине периода наблюдений примерно 30% реперов на колоннах были повреждены, к концу периода наблюдений – 60%. На некоторых колоннах оставалось по одной паре реперов, на некоторых – ни одной;

- помимо замеров деформаций колонн, на объекте выполнялись геодезические наблюдения за кре-

Башня "Москва"



Башня "Санкт-Петербург"

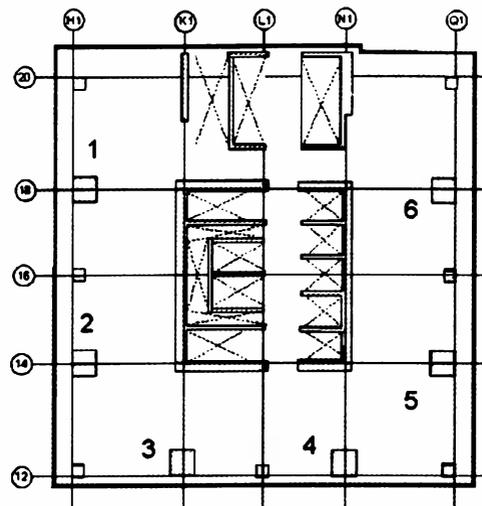
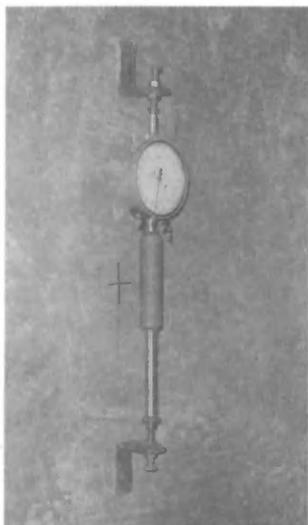


Рис. 2. Планы этажей. Номерами выделены наиболее нагруженные колонны, для которых выполнялись замеры деформаций в процессе возведения

а)



б)

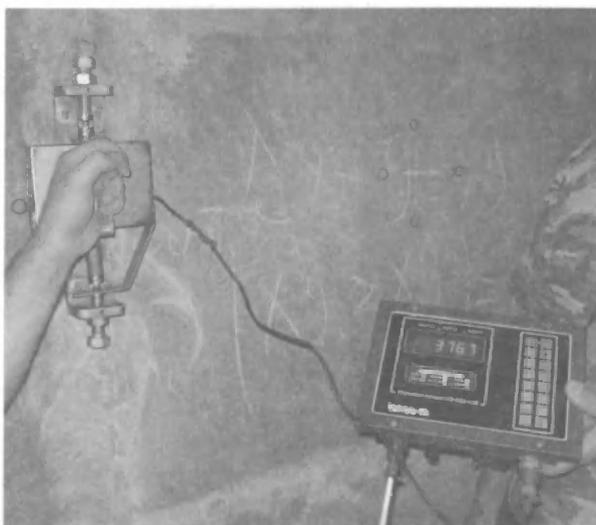


Рис. 3. Индикатор часового типа (а) и электронный тензометр (б), установленные между реперами для замера деформаций

ном каркаса и прогибами ростверков. Однако на настоящем этапе работ данные, полученные разными методами, не имели заметной корреляции;

- данные по замерам давления в грунте основания и напряжений в сваях-стойках заказчиком не предоставлены. Возможно, эти измерения не велись.

Полученные в ходе мониторинга фактические деформации сравнивали с теоретическими величинами, полученными на математической модели.

Теоретические усилия и деформации колонн определяли по результатам статического расчета модели зданий, предоставленной проектной организацией – автором проекта, методом конечных элементов с применением ПК "Лира 9.2PRO". Расчет выполнялся в упругой постановке, с учетом длительного модуля деформаций бетона. Класс бетона принимали по данным испытаний неразрушающими методами по ГОСТ 22690-88, подтвердивших соответствие фактической прочности бетона проектной.

Сопоставление значений фактических и теоретических деформаций выполнялось на основе графи-

ков. Так как за период наблюдений интенсивность возведения зданий была неравномерной, были построены не традиционные графики зависимости деформаций от роста внешней нагрузки (высоты возведенной части зданий), а графики зависимости фактических и теоретических деформаций на разных этапах наблюдений, т. е. зависимость деформаций от времени наблюдений. Наиболее характерные графики изменения теоретических и фактических деформаций колонн представлены на рис. 4. Время наблюдения в сутках отложено по горизонтальной оси. Значения деформаций (отложены по вертикальной оси) представлены увеличенными в  $10^5$  раз. Значения деформаций на каждом этапе измерений принимались как среднее арифметическое по 4 граням (или не поврежденным реперам).

Из графиков следует, что фактические деформации существенно отличались от теоретических, особенно в начальный период измерений. На 90 сутки наблюдений возник вопрос, не свидетельствуют ли выявленные деформации о наступлении недопусти-

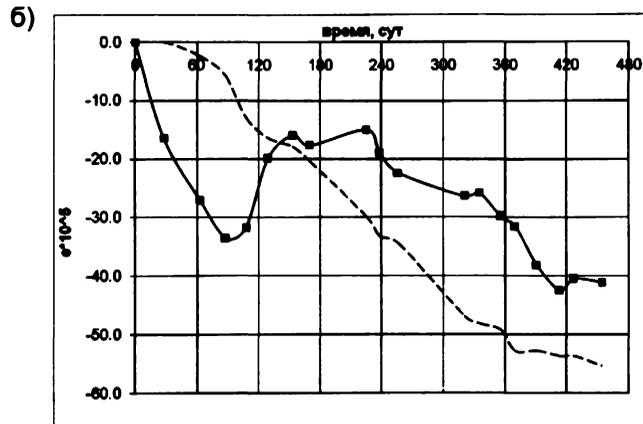
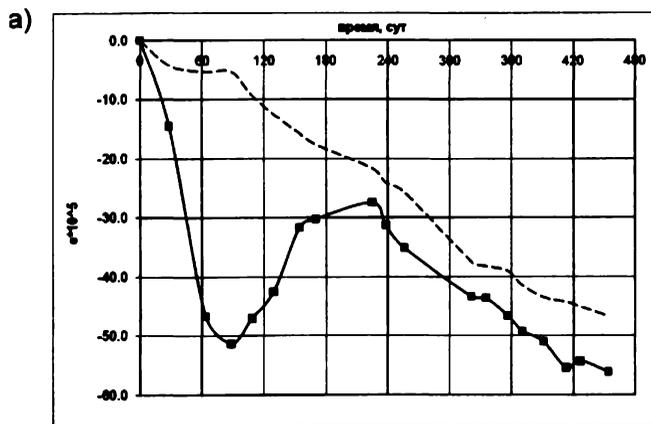


Рис. 4. График фактических (сплошная линия) и теоретических (пунктирная) деформаций для колонны G/29 башни "Москва" (а) и колонны H1/18 башни "Санкт-Петербург" (б)

мого состояния конструкций каркаса здания? И не свидетельствует ли график на рис. 4, а о несоответствии действительной работы колонны принятым при расчете предпосылкам?

В имеющейся литературе четкого критерия оценки полученных результатов не было обнаружено [4]. Поэтому было решено применить методику определения критериев безопасности [5], как это делается в гидротехническом строительстве, а оценку состояния конструкций выполнить по этим критериям.

В соответствии с [5] назначались диагностические показатели  $K_1$  и  $K_2$ , определяемые по результатам расчетов на основное и особое сочетание нагрузок. Для рассматриваемых конструкций и всего каркаса здания было принято, что  $K_1$  — первый предупреждающий (потенциально опасный) уровень значений диагностических показателей, при достижении которого устойчивость и несущая способность еще соответствует условиям нормальной эксплуатации.  $K_2$  — второй предельный (предаварийный) уровень значений диагностических показателей, при превышении которого работа конструкций не соответствует принятым при проектировании предпосылкам.

На настоящем этапе для определения критериев безопасности создавались прогнозные математические модели. По мере накопления опыта мониторинга они могут быть уточнены на основе данных натурных наблюдений. Учитывая сложность задачи, на настоящем (начальном) этапе определялись критериальные диагностические показатели по смешанной (детерминистической и статистической) модели, путем назначения и анализа влияния различных факторов, влияющих на работу конструкций.

**Определение диагностического показателя  $K_1$ :**

1. *Учет деформаций вследствие колебаний температуры.* Как отмечают зарубежные исследователи, неучет суточных колебаний температуры приводит к ошибке при определении деформаций, сопоставимой с нагрузкой от одного возведенного этажа. Учитывая наибольшую амплитуду колебаний холодного времени года для г. Москвы  $6,5^\circ\text{C}$  (СНиП 23-01-99\*, табл. 1), принимали погрешность  $6,5 \cdot 10^{-5}$ ;

2. *Учет деформаций вследствие усадки бетона.* В соответствии с [6], определяется максимальная усадка бетона в зависимости от его состава. Так, для примененной смеси БСГ В60 П5 с расходом цемента 500 кг и воды 160 кг на  $1\text{ м}^3$  бетона предельная расчетная усадка составляла  $66 \cdot 10^{-5}$ . С учетом толщины конструкции и времени твердения бетона значение усадки составило  $(20 \dots 49) \cdot 10^{-5}$ . То есть приращение деформаций за счет усадки могло составить от нуля в начале до  $49 - 20 = 29 \cdot 10^{-5}$  в конце измерений;

3. *Учет деформаций за счет изменчивости модуля деформаций.* В соответствии с [7], изменчивость жесткости учитывается введением коэффициента 0,8. Так как теоретические деформации получены по упругой модели, эти деформации составят 20% от теоретических, т. е. до  $(8 \dots 11) \cdot 10^{-5}$ ;

4. *Учет деформаций за счет увеличения погрешности определения среднего значения на последних этапах измерений, когда часть реперов была повреждена.* Отличие частных значений от среднего в пределах отдельных колонн составляло 50-90%. Поэтому погрешность определения среднего принимали равной нулю в начале измерений до  $0,9/4 \approx 0,22$  в конце измерений;

5. *Учет деформаций за счет изгибающих моментов.* Рассматриваемые колонны скорее относятся к кубам с объемным напряженным состоянием, чем к прямоугольникам с одноосным или двухосным напряженным состоянием. Поэтому приращением деформаций за счет изгибающих моментов пренебрегаем.

На каждом этапе мониторинга полученные значения дополнительных деформаций переводились в доли от теоретического расчетного значения. Суммарную погрешность определяли как корень из суммы квадратов каждой из указанных выше погрешностей. Полученные значения прибавляли к теоретическим значениям. Так были построены новые кривые значений деформаций, соответствующие показателю  $K_1$ , с учетом погрешностей расчета теоретических деформаций. Эти кривые, определенные для тех же колонн, что и на рис. 4, показаны на рис. 5. Из

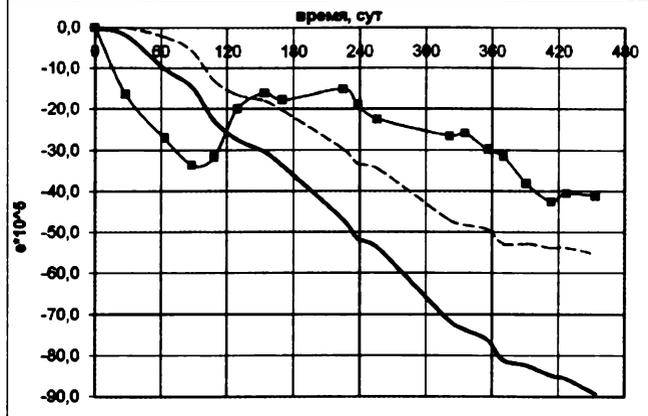
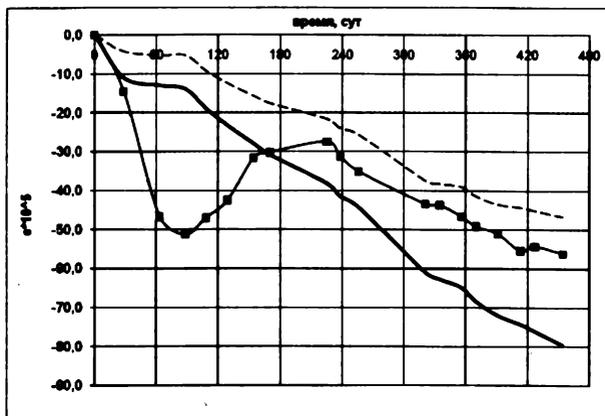


Рис. 5. График фактических (сплошная линия), теоретических по результатам упругого расчета (пунктирная) и теоретических с учетом погрешностей, принятых при определении  $K_1$  (сплошная жирная линия) деформаций для колонны G/29 башни "Москва" (а) и колонны H1/18 башни "Санкт-Петербург" (б)

него следует, что до 120-160 сут фактические деформации превышали значения, соответствующие показателю  $K_1$ . По-видимому, это объясняется неравномерностью напряженного состояния по сечению колонн, а также влиянием усадки.

При больших сечениях колонн, в период набора прочности бетона, внутренние слои под действием экзотермии имеют большую температуру. Набор прочности и все процессы, его сопровождающие, протекают во внутренних слоях более интенсивно. В результате на наружных гранях возникает растягивающие напряжения. Поэтому при увеличении нагрузки сначала происходит компенсация возникающих растягивающих напряжений, а затем уже сжатие. Предположительно большие значения деформаций, зарегистрированные в начальный период, объясняются этими факторами. Затем, к концу наблюдений, фактические деформации не превышали значений, соответствующих показателю  $K_1$ . Это свидетельствовало о том, что устойчивость и несущая способность колонн соответствует предпосылкам и допущениям, принятым при проектировании.

**Определение диагностического показателя  $K_2$ :** нагрузки и воздействия, учитываемые в особых сочетаниях нагрузок, как правило, проявляются в стадии эксплуатации здания. К таким воздействиям можно отнести деформации колонн, возникающие вследствие:

- нарушения совместной работы грунта основания и фундамента здания [8];
- просадки основания;
- снижения несущей способности свай (например, вследствие дефектов их изготовления);
- прогрессирующего обрушения;
- террористических атак и др.

Наблюдения за деформациями были прерваны до завершения возведения зданий. В стадии эксплуатации наблюдения за деформациями не велись. Поэтому на настоящем этапе замеры деформаций, соответствующих показателю  $K_2$ , не выполнялись.

## Выводы

1. Нормативные документы, регламентирующие проведение мониторинга возведения и эксплуатации гражданских зданий, не всегда содержат четкие критерии несоответствия действительной работы колонн принятым при расчете предпосылкам.
2. В настоящее время, до накопления достаточного опыта, может применяться методика определения критериев безопасности [5], как это делается в гидротехническом строительстве. Оценка состояния конструкций по результатам мониторинга может выполняться по этим критериям.
3. Учитывая, что в стадии возведения конструкции недогружены, а большинство особых воздействий еще не могут возникнуть, для стадии возведения здания оценку результатов мониторинга наиболее целесообразно выполнять по критерию  $K_1$ .

## Библиографический список

1. Временные нормы и правила обследования и мониторинга технического состояния зданий и сооружений в городе Москве (МГСН 2.10-04).
2. МРДС 02-08 Пособие по научно-техническому сопровождению и мониторингу строящихся зданий и сооружений, в том числе большепролетных, высотных и уникальных.
3. Временные рекомендации по организации технологии геодезического обеспечения строительства многофункциональных высотных зданий - М, 2007.
4. Дергунов А.А., Хиславский Г.Х., Неугодников А.П., Давидюк А.Н. Диалоги о мониторинге-2, или Нормативы по научно-техническому сопровождению строительства//Технологии строительства. - № 3. - 2008.
5. РД 153-34.2-21.342-00 Методика определения критериев безопасности гидротехнических сооружений. - М, 2001.
6. Рекомендации по обеспечению трещиностойкости монолитных стен. - М., ЦНИИЭП жилых зданий, 1984. - 49 с.
7. Залесов А.С., Кодыш Э.Н., Лемьш Л.Л., Никитин Н.Н. Расчет железобетонных конструкций по прочности, трещиностойкости и деформациям. - М, 1988.
8. Юдахин Ю.Н., Капустян Н.К., Антоновская Г.Н. Инженерно-сейсмические исследования геологической среды и строительных конструкций с использованием ветровых колебаний зданий. - М, 2007.

*И.Л. ЧУЛКОВА, канд. техн. наук, доц. (Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия, Омск); С.М. КУЗНЕЦОВ, канд. техн. наук, доц. (Сибирский государственный ун-т путей сообщения, Новосибирск)*

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗОЛЫ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Изучение применения отходов промышленности при производстве ЖБИ ведется уже давно. Еще в 60-е годы прошлого столетия была доказана эффективность применения тонкомолотых минеральных добавок техногенного происхождения для регулирования свойств бетонных смесей.

Минеральные добавки делятся на активные и инертные. Зола Омских ТЭС являются именно активными добавками, т.е., помимо уплотнения бетонной смеси, принимают участие в ее твердении (в присутствии воды активно участвуют в образовании гидросиликатов и гидроалюминатов кальция – основных структурообразующих компонентов цементного камня).

Немаловажен и тот факт, что огромное количество золы скапливается в отвалах и является источником загрязнения природной среды. И тут государство должно сыграть свою роль в инвестировании, субсидировании и льготном кредитовании предприятий, активно применяющих золошлаковые отходы (ЗШО).

Помимо всего прочего, зола является общедоступным, бесплатным сырьем, не требующим добычи, переработки и специальных условий хранения, что немаловажно в современных условиях рыночной экономики. Применение золошлаковых отходов позволяет сделать продукцию более конкурентоспособной, за счет снижения цены готового изделия, при прочих равных показателях.

Использование микрозаполнителя в составе пескобетона позволило увеличить плотность смеси вследствие наиболее плотного заполнения пустот между частицами песка. К тому же смешанное цементно-зольное вяжущее полностью обволакивает инертный заполнитель. Для содержащих золу составов отмечено пониженное водоотделение и расслаиваемость смеси. Образцы, изготовленные из бетона с добавкой золы, имели гладкую ровную поверхность без раковин и крупных пор.

Применяемая зола-уноса была образована в результате сжигания угля на Омской ТЭЦ. По своей структуре она достаточно однородна, на 85% состоит из алюмосиликатов с большим содержанием SiO<sub>2</sub> (табл. 1). Кроме того, она практически не содержит несгоревших частиц, которые являются вредными примесями, сдерживающими применение некоторых зол. Удельная поверхность золы составляет 300-350 м<sup>2</sup>/кг (использовалась зола, уловленная

электрофильтрами). Плотность золы – 2800 кг/м<sup>3</sup>. Химический состав ее представлен в табл. 1.

Таблица 1

Материал	Химический состав золы						
	Массовая доля основных компонентов, %						
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
Зола-уноса	59,85	28,37	5,00	2,16	0,50	0,70	0,90

Оптимальные составы песчаного бетона с добавкой золы-уноса приведены в табл. 2.

С введением золы повысилась также и водопотребность смеси. Это связано тем, что зола имеет более развитую поверхность частиц и более пористую структуру. Регулирование водопотребности производится введением в состав пластификатора. Введение золы в состав бетона приводит к снижению его плотности, тем большее, чем выше количество вводимой добавки. Это можно объяснить пониженной насыпной плотностью золы, а также повышенным расходом воды в модифицированных бетонах. При этом закономерно снижается теплопроводность бетона. При добавлении золы морозостойкость бетона не снижается. Зафиксированная усадка модифицированных бетонов не превышает нормативных показателей.

Таблица 2

Оптимальные составы песчаного бетона с добавкой золы-уноса

Класс бетона по прочности на сжатие	ОК, см	Расход материалов, кг/м <sup>3</sup>				В/Ц	В/В
		цемент	зола-унос	песок	вода		
Твердение в условиях тепловлажностной обработки							
В15	2	225	250	1335	280	1,24	0,59
	8	270	250	1250	320	1,18	0,61
В22,5	2	345	250	1225	290	0,84	0,49
	8	390	250	1140	330	0,85	0,51
В30	2	490	100	1290	270	0,55	0,46
	8	520	100	1220	310	0,60	0,50
Твердение в нормальных условиях							
В15	2	320	250	1235	285	0,89	0,50
	8	360	250	1160	320	0,89	0,50
В22,5	2	440	200	1230	280	0,64	0,44
	8	510	100	1220	310	0,61	0,50

Введение в бетонную смесь золы улучшает удобоукладываемость. Уже первыми исследователями было установлено, что зависимость подвижности бе-

тонной смеси от содержания в смеси золы имеет экстремальный характер, и оптимальное содержание ее должно быть не более 30% массы вяжущего. Удобноукладываемость бетонной смеси улучшается при введении золы за счет остеклованной поверхности слагающих ее частиц, которые уменьшают внутреннее трение в бетонной смеси и снижают вязкость. Бетонные смеси с оптимальной добавкой золы имеют достаточно высокую жизнеспособность и пригодны для транспортирования на дальние расстояния.

Наиболее благоприятно влияние добавки золы на прочность бетона при относительно небольшом расходе вяжущего. Это обусловлено заметным снижением водопотребности "тощих" бетонных смесей при замене части цемента золой. Влияние дисперсности золы на прочность бетона проявляется явно сильнее, чем цемента. Это обусловлено заметным пластифицирующим эффектом тонких фракций золы на бетонные смеси, несмотря на увеличение нормальной плотности золосодержащих цементов.

Опытами установлено, что применение золы-уноса в пропариваемых бетонах снижает расход цемента на 35...160 кг/м<sup>3</sup>, а в бетонах нормального твердения на 20...50 кг/м<sup>3</sup>. Как известно, на прочность песчаного бетона существенное влияние оказывает крупность песка. Для оценки этого влияния на прочность песчаного бетона с добавкой золы-уноса были проведены специальные опыты (см. табл. 2). В опытах использовали крупный ( $M_K = 2,68$ ) и мелкий ( $M_K = 1,03$ ) пески.

Из табл. 3 следует, что при расходе цемента примерно 300 кг/м<sup>3</sup> и золы-уноса примерно 100 кг/м<sup>3</sup> (составы 1-3) наибольшая прочность бетона получается при  $M_K = 1,87$ , наименьшая – при  $M_K = 2,68$ . Это объясняется тем, что при указанном содержании цемента и золы-уноса для крупного песка не хватает мелких частиц, которые бы позволили создать плотную упаковку бетонной смеси. При расходе цемента и золы примерно по 300 кг/м<sup>3</sup> (составы 4-6) наибольшая прочность бетона получается при  $M_K = 2,68$ , наименьшая – при  $M_K = 1,03$ . В последнем случае появляется избыток мелких частиц, который не позволяет создать оптимальную микроструктуру бетонного камня.

Таблица 3  
Влияние крупности песка на прочность песчаного бетона с добавкой золы-уноса

$M_K$ песка	Расход материалов, кг/м <sup>3</sup>				Плотность смеси, кг/м <sup>3</sup>	ОК, см	$R^{28}_{с.ж}$ после пропарки
	цемент	зола-уноса	песок	вода			
2,68	295	98	1437	291	2122	2	14,8
1,87	315	105	1430	278	2120	2	23,6
1,03	316	105	1432	249	2102	3	15,3
2,68	297	297	1148	289	2031	2	29,0
1,87	295	295	1130	303	2024	2,5	27,4
1,03	312	312	1194	240	2058	2,5	24,7
2,68	606	101	1181	289	2177	2	51,8
1,87	594	99	1180	291	2164	2	49,7
1,03	598	100	1176	282	2156	2	50,1

Таким образом, установлено, что влияние крупности песка на прочность песчаного бетона с добав-

кой золы-уноса зависит от содержания в бетоне цемента и золы. Это позволяет путем регулирования расхода последних, подбора их оптимального соотношения получать мелкозернистый бетон необходимой прочности при использовании песка различной крупности, в том числе и очень мелкого (с  $M_K = 1...1,3$ ).

Были изготовлены образцы-кубы из песчаного бетона без добавки и с добавками зол-уноса ТЭС. Эти образцы после пропаривания были испытаны на сжатие в возрасте 28 сут. При этом вычислен также расход цемента на единицу прочности бетона – показатель, характеризующий эффективность использования цемента (табл. 4).

Таблица 4  
Зависимость прочности бетона от расхода золы-уноса

Расход материалов, кг/м <sup>3</sup>					ОК, см	$R^{28}_{с.ж}$ после пропарки	Расход цемента на единицу прочности бетона, (кг/м <sup>3</sup> )/МПа
цемент	зола-уноса	зола-отвала	песок	вода			
292	–	–	1432	278	2,5	11,2	26,0
295	98	–	1437	291	2	14,8	19,9
296	148	–	1379	292	2	19,0	15,6
298	199	–	1293	285	2,5	24,4	12,2
297	297	–	1148	289	2	28,3	10,5
313	–	104	1421	278	2,5	22,9	13,7
318	–	259	1390	265	2	31,6	10,0
328	–	219	1369	250	1,5	37,3	8,8
330	–	275	1320	248	1,5	40,0	8,2

В результате исследования основных физико-механических свойств песчаных бетонов с добавкой золы-уноса и золы-отвала установлено, что их показатели соответствуют нормируемым СНиП 2.03.01-84\* для мелкозернистых бетонов. Причем начальный модуль упругости и прочности на осевое растяжение бетона с добавкой золы оказались даже несколько выше, чем нормируемые СНиП.

Бетон с добавкой золы-уноса отличается от бетона без добавки лучшей удобоукладываемостью.

Одним из эффективных видов мелкозернистого бетона является бетон на смешанном заполнителе из песка и золошлаковой смеси ТЭС. В данной работе приводятся результаты исследований мелкозернистого бетона на заполнителе из песка, золы-отвала и золы-уноса. В качестве вяжущего в исследованиях применяли портландцемент марки 400. Оптимальные составы бетона на заполнителе из золошлаковой смеси приведены в табл. 5.

В технологии бетона большое внимание уделяется зерновому составу заполнителей как одному из значимых факторов, влияющих на физико-технические свойства и экономичность. При подборе зернового состава заполнителей тяжелого бетона стремятся к тому, чтобы пустотность смеси щебня и песка была минимальной. Оптимальным считается такое соотношение между песком и щебнем, при котором достигается не только наивысшая прочность бетона, но и наилучшая подвижность бетонной смеси.

Самая высокая прочность бетона достигается, когда доля зольной фракции в золошлаковой смеси

Оптимальные составы бетона на смешанном заполнителе

№ п/п	Расход материалов, г						$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	ОК, см	$R^{28}_{сж}$ , МПа
	цемент	зола-уноса	зола-отвала	песок	вода	СС ФС			
1	75	–	–	225	45	1,0	2099	2	18,0
2	72	15	–	213	40	1,0	2121	2	20,3
3	67	33	–	200	48	1,0	1955	2	23,9
4	60	60	–	180	40	1,0	1840	2	19,7
5	72	15	106	107	44	1,0	2151	2	28,6
6	67	33	100	100	50	1,0	2256	2	35,8
7	60	60	90	90	55	1,0	2214	2	31,6

Таблица 6

Основные характеристики моделей

Показатель	Модель П	Модель Ц	Модель В	Модель $З_0$	Модель $З_y$	Модель $R_6$
Доля объясненной вариации, %	92,25588	97,34974	85,63010	94,68594	95,18340	97,47060
Коэффициент множественной корреляции	0,96050	0,98666	0,92537	0,97307	0,97562	0,98727
Средний отклик	1301,72	355,34	286,06	35,142	120,55	24,81
Стандартная ошибка в % от среднего отклика	2,23	4,11	2,84	55,03	20,08	6,69
Стандартная ошибка	29,077	14,609	8,134	19,338	24,20166	1,66006
Общий $F$ - критерий регрессии	11836,79	30408,09	4227,48	12640,61	14019,40	27337,87
Табличное значение общего $F$ - критерия	3,84	3,84	3,84	3,84	3,84	3,84

составляет 20-30%. При изменении содержания в золошлаковой смеси мелких фракций в пределах от 20 до 40% прочность бетона снижается всего на 7-14%. Отмеченная особенность представляет практический интерес, так как позволяет не предъявлять к золошлаковой смеси жестких требований по зерновому составу. Следует отметить, что бетоны на смешанном заполнителе из золошлаковой смеси, являясь по своей структуре мелкозернистыми, по физико-механическим свойствам не уступают традиционным тяжелым бетонам на природных заполнителях, а по ряду показателей превосходят их. Для бетона с золошлаковыми заполнителями эффективна тепловая обработка. Прочность его после пропаривания составляет 0,80-0,85 от марочной.

По ряду показателей бетон на заполнителе из золошлаковых смесей превосходит обычные тяжелые бетоны. Так, например, плотность его ниже на 150-300 кг/м<sup>3</sup>, прочность при изгибе выше на 10-15%, водонепроницаемость при одинаковых расходах цемента выше на две марки. На основе золошлаковой смеси могут быть получены бетоны классов В3.5-В50 по прочности, марок F25-F300 по морозостойкости и W2-W12 по водонепроницаемости. Применение бетонов на однокомпонентном заполнителе из золошлаковой смеси позволяет использовать до 30-35% топливных отходов без их переработки.

Проведенные исследования позволили оптимально подбирать состав мелкозернистых бетонов с заданной прочностью с помощью многофакторных математических моделей. Ниже приводится алгоритм подбора мелкозернистых бетонов. Вначале определяем расход песка, цемента и воды по формулам 1-3 при нулевом расходе золы-отвала и золы-уноса. Далее задаемся частью песка и цемента, которые мы собираемся заменить золой. По формулам 4 и 5 определяем соответственно расход золы-уноса и золы-отвала. Затем по формулам 1-3 окончательно подби-

раем состав бетонной смеси и по формуле 6 определяем ожидаемую прочность бетона.

Расход песка ( $П$ ) находим по формуле

$$П = + 1473,4 - 4,829439 \cdot R_6 - 0,5292 \cdot З_y + 0,69526 \cdot T - 10,34 \cdot O_k + 0,0966 \cdot З_0, \quad (1)$$

где  $R_6$  - требуемая прочность бетона, МПа;  $T$  - температура пропаривания бетона, °С;  $З_y$  - расход золы-уноса, кг;  $З_0$  - расход золы-отвала, кг;  $O_k$  - осадка конуса, см.

Расход цемента ( $Ц$ ) определяем по формуле

$$Ц = + 441,5 + 8,261202 \cdot R_6 - 0,11107 \cdot П - 1,17014 \cdot T - 0,514 \cdot З_y - 0,71247 \cdot З_0 + 4,7458 \cdot O_k \quad (2)$$

Расход воды ( $В$ ) определяем по формуле

$$В = + 337,8 - 0,05525 \cdot П + 5,424 \cdot O_k - 0,4533 \cdot R_6 + 0,09091 \cdot T + 0,01572 \cdot Ц + 0,0184 \cdot З_y - 0,048 \cdot З_0 \quad (3)$$

Расход золы-отвала ( $З_0$ ) описывается формулой

$$З_0 = + 580,63 - 1,2438 \cdot Ц + 10,729 \cdot R_6 - 0,1109 \cdot П - 1,4676 \cdot T - 0,64566 \cdot З_y - 0,2713 \cdot В - 7,29 \cdot O_k \quad (4)$$

Расход золы-уноса ( $З_y$ ) находим по формуле

$$З_y = + 1117,93 - 0,51409 \cdot П - 1,41282 \cdot Ц + 10,189 \cdot R_6 - 1,501 \cdot T + 0,16295 \cdot В - 1,011279 \cdot З_0 + 2,283960 \cdot O_k \quad (5)$$

Прочность бетона ( $R_b$ ) можно оценить по формуле

$$R_b = - 17,0 + 0,10694 \cdot Ц + 0,1382 \cdot Т - 0,004934 \cdot П + 0,04794 \cdot З_y - 0,01888 \cdot В + 0,07906 \cdot З_o - 0,549 \cdot О_k \quad (6)$$

Приведенные выше модели подбора составов мелкозернистых бетонов позволяют оценить эффективность и организационно-технологическую надеж-

ность этих бетонов. Характеристики моделей подбора составов мелкозернистых бетонов приведены в табл. 6.

Комплексное исследование зол-уноса и золошлаковых смесей позволяет снизить стоимость строительства, решить целый ряд задач, связанных с охраной окружающей среды, а также с устранением дефицита природных микронаполнителей и заполнителей бетона.

*Н.Р. РАХИМОВА, канд. техн. наук, доц., Р.З. РАХИМОВ, д-р техн. наук, чл.-корр. РААСН (Казанский государственный архитектурно-строительный ун-т)*

## **СВОЙСТВА ШЛАКОЩЕЛОЧНЫХ БЕТОНОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СОСТАВА И ДИСПЕРСНОСТИ ВЯЖУЩЕГО НА ОСНОВЕ НЕЙТРАЛЬНОГО ДОМЕННОГО ШЛАКА**

Решение задач увеличения объемов гражданского и промышленного строительства может быть обеспечено при соответствующем наращивании объемов производства вяжущих и бетонов. В "Стратегии развития строительного комплекса Российской Федерации на перспективу до 2010 года" в порядке реализации требований обеспечения ресурсо- и энергосбережения и охраны окружающей среды среди прочих ставится задача "...замещения на 20-30% природного минерального сырья производственными и бытовыми отходами при производстве бетонов, растворов ...". В связи с этим актуальным становится развитие производства вяжущих на основе отходов промышленности с пониженным энергопотреблением и наименьшими объемами вредных выбросов в окружающую среду, одной из эффективных разновидностей которых являются шлакощелочные (ШЩВ).

В их разработке имеются значительные достижения отечественной науки и положительный опыт применения [1, 2]. В 70-80 гг. прошлого столетия в нашей стране в ряде городов действовали предприятия, производящие ШЩВ и бетоны на их основе (ШЩБ). С первых лет перестройки экономики страны они перестали существовать по ряду причин – отсутствие дефицита цемента, нехватка щелочного затворителя, высолообразование и недостаточная стабильность свойств вяжущих и бетонов. Резко снизились в России и объемы исследований по разработке ШЩВ и ШЩБ, а имеющая наибольшие достижения в этой области Киевская научная школа теперь не в нашей стране. Повышающиеся требования по ресурсо- и энергосбережению и охране окружающей среды делают необходимым наращивание в России исследований по разработке ШЩВ и бетонов на их основе.

С учетом мировых тенденций увеличения преимущественно композиционных вяжущих развитие исследований ШЩВ является актуальным в направлении разработок и создания производств композиционных шлакощелочных вяжущих (КШЩВ) с добавками природного и техногенного происхождения. В

течении последних лет на кафедре строительных материалов разработан ряд КШЩВ с различными добавками и бетоны на их основе [3-7].

В настоящей статье приведены результаты исследований влияния удельной поверхности молотых шлака и смеси его с добавкой боя керамического кирпича (БКК), вида затворителя, условий твердения на прочность при сжатии, среднюю плотность, водопоглощение, морозостойкость, водонепроницаемость и высолообразование ШЩБ. Исследования влияния добавок БКК на свойства КШЩВ проводились одновременно с целью установления одного из направлений рационального использования этого многотоннажного отхода строительной отрасли.

Для получения КШЩВ использовался шлак Орско-Халиловского металлургического комбината с модулем основности  $M_o = 1,006$ , модулем активности  $M_a = 0,205$ , коэффициентом качества  $K_k = 1,399$ , химического состава (масс.%):  $SiO_2 - 40,02$ ;  $CaO - 42,02$ ;  $Al_2O_3 - 8,22$ ;  $MgO - 6,26$ ;  $MnO - 0,36$ ;  $Fe_2O_3 < 0,1$ ;  $TiO_2 - 0,36$ ;  $Na_2O - 0,44$ ;  $K_2O - 0,66$ ;  $P_2O_5 - 0,04$ ;  $SO_3 - 1,45$ . Шлак состоит в основном из рентгеноаморфной фазы с примесью 8-10% кристаллического вещества, являющегося минералом группы окерманит-геленита.

Предварительные исследования влияния БКК - отходов двух кирпичных заводов и 2-х видов, полученных при сносе зданий, на свойства КШЩВ не показали существенного отличия свойств вяжущего от различия в химическом, минеральном и фазовом составе, принятых при исследованиях видов БКК.

В настоящей работе применялся БКК – отход "Казанского КСМ" состава (масс.%):  $SiO_2 - 77,52$ ;  $Al_2O_3 - 9,85$ ;  $CaO - 2,03$ ;  $MgO - 1,15$ ;  $Fe_2O_3 - 4,4$ ;  $TiO_2 - 0,63$ ;  $FeO - 0,27$ ;  $MnO - 0,06$ ;  $Na_2O - 0,84$ ;  $K_2O - 2,28$ ;  $P_2O_5 - 0,1$ ;  $SO_3 - 0,07$ ; ппп - 0,64.

Затворение вяжущих производилось водными растворами жидкого стекла (ГОСТ 13078-81) с сили-

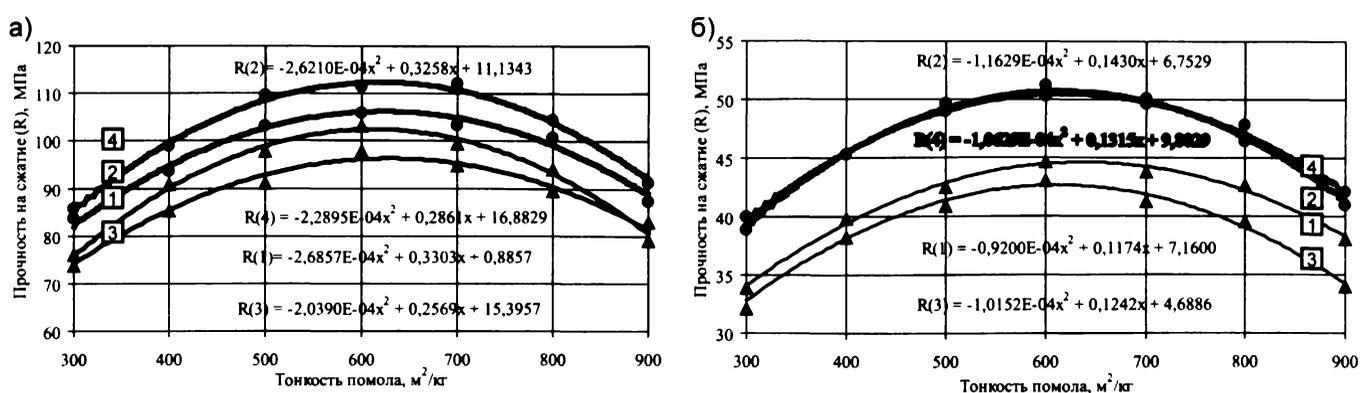


Рис. 1. Влияние удельной поверхности шлака ОХМК на прочность ШЩБ, изготовленного на водном растворе

а - жидкого стекла  $\rho = 1,3 \text{ г/см}^3$ ;  $M_c = 1,5$ ; б - соды  $\rho = 1,15 \text{ г/см}^3$ ;

1 - ШЩВ0 после ТВО; 2 - ШЩВ0Д30 после ТВО; 3 - ШЩВ0 после 28 сут; 4 - ШЩВ0Д30 после 28 сут

катным модулем  $M_c = 1,5$  и кальцинированной соды (ГОСТ 5100-85) плотностью при 20°C соответственно 1,3 и 1,15 кг/л.

Влияние содержания добавки БКК независимо от тонкости помола смеси шлака с добавкой, вида затворителя, химического и минерального составов добавки на прочность КШЩВ характеризуется экстремальной зависимостью с максимумом при 30%-ном содержании добавки. В связи с этим исследования влияния дисперсности смеси шлаков с БКК на свойства КШЩВ проводились при этом содержании добавки. В соответствии с известным обозначением шлакощелочного вяжущего, не содержащего добавок клинкера [8], ШЩВ0 и с применяемой в обозначении марок портландцемента с добавками аббревиатурой шлакощелочное вяжущее с 30% минеральной добавки в настоящей работе обозначено как ШЩВ0Д30.

Влияние тонкости помола шлака и смеси шлака с добавкой в пределах от 300 до 900 м<sup>2</sup>/кг на прочность камня ШЩВ0 и ШЩВ0Д30 также описывается экстремальными зависимостями независимо от условий твердения с максимумом при 600-700 м<sup>2</sup>/кг.

При этом прочность камней вяжущих, затворенных растворами жидкого стекла и соды, через 28 сут нормально-влажностного твердения повышается соответственно: ШЩВ0 со 104 до 122 МПа и с 53 до 67,5 МПа, ШЩВ0Д30 со 108 до 130 МПа и с 32 до 42,6 МПа. При термовлажностной обработке по режиму 4+3+6+3 ч с изотермической выдержкой при 95°C прочность камня вяжущих повысилась соответственно: ШЩВ0 со 108 до 137 МПа и с 38 до 50,5 МПа, а ШЩВ0Д30 со 117 до 140 МПа и с 33,3 до 44,5 МПа.

Влияние добавок БКК в КШЩВ на свойства бетона исследовалось на составе бетонной смеси с осадкой конуса 0-2 см, рассчитанного по рекомендациям НИИЖБ, с соотношением ШЩВ0(ШЩВ0Д30):П:Щ=1:1,5:3,4 при расходе молотого шлака (молотой смеси шлака и БКК) на 1 м<sup>3</sup> бетона 385,5 кг и растворошлаковом отношении 0,32-0,35. В качестве мелкого заполнителя использован обогащенный кварцевый песок с  $M_{кр} = 2,35$ , в каче-

стве крупного заполнителя – гранодиоритовый щебень марки по дробимости Д1400.

На рис.1 приведены результаты исследований влияния удельной поверхности шлака и смеси его с БКК в диапазоне от 300 до 900 м<sup>2</sup>/кг на прочность ШЩБ на основе ШЩВ0 и ШЩВ0Д30.

Анализ приведенных на рис.1 данных показывает, что прочность бетонов на основе КШЩВ с добавкой БКК выше прочности бетонов на бездобавочном вяжущем независимо от тонкости помола и режимов твердения.

В известных рекомендациях по получению ШЩВ и бетонов на их основе установлены требования помола шлака до дисперсности 300-350 м<sup>2</sup>/кг. Анализ приведенных на рис.1 данных показывает эффективность помола шлака для ШЩВ и смеси его и БКК до удельной поверхности 600-700 м<sup>2</sup>/кг. При этом прочность бетонов, затворенных растворами жидкого стекла и соды, через 28 сут нормально-влажностного твердения повышается соответственно на основе: ШЩВ0 – на 33,9 и 40,5%; ШЩВ0Д30 – на 30 и 28%. После термовлажностной обработки по описанному выше режиму прочность бетонов повысилась соответственно на основе: ШЩВ0 – на 37,3 и 33,0%, ШЩВ0Д30 на 26,5 и 28,7%.

На рис. 2 приведены данные исследований кинетики твердения бетонов на основе ШЩВ0 и ШЩВ0Д30 в зависимости от их удельной поверхности. Анализ представленных результатов показывает следующее:

- введение 30% добавки БКК в состав ШЩВ снижает прирост прочности бетона в ранние сроки, а при дисперсности КШЩВ 300 м<sup>2</sup>/кг бетон в первые сутки не твердеет;

- после 7 сут бетоны на КШЩВ набирают более высокую прочность, чем бетоны на бездобавочном вяжущем;

- увеличение тонкости помола вяжущих от 300 до 900 м<sup>2</sup>/кг ускоряет твердение ШЩБ в ранние сроки, в наибольшей степени при дисперсности вяжущих 900 м<sup>2</sup>/кг;

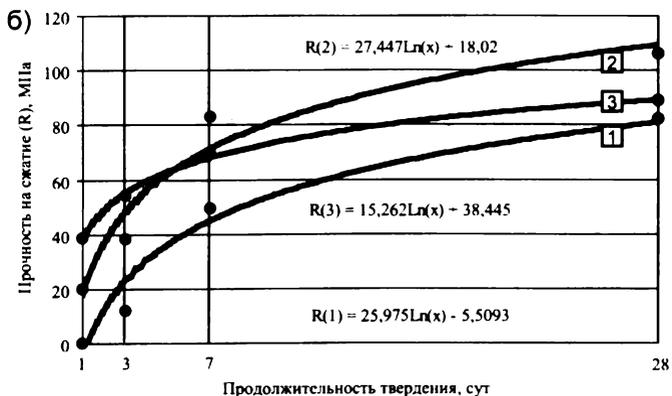
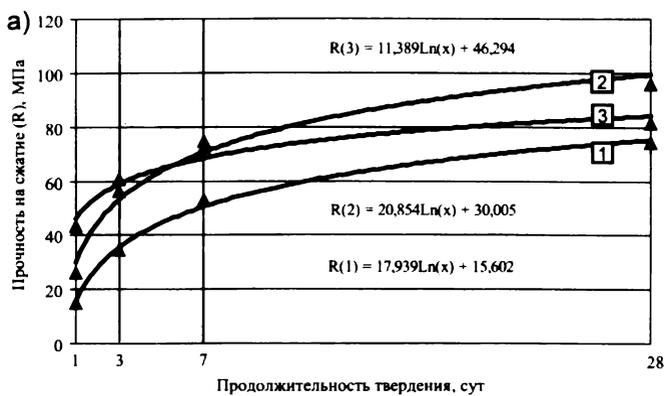


Рис. 2. Зависимость изменения прочности на сжатие ШЩБ при использовании шлака ОХМК и водного р-ра жидкого стекла от продолжительности твердения

а - ШЩВ0; б - ШЩВ0Д30;

1 - состав с  $S_{y\partial} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$  шлака; 2 - состав с  $S_{y\partial} = 600 \text{ м}^2/\text{кг}$  шлака; 3 - состав с  $S_{y\partial} = 900 \text{ м}^2/\text{кг}$  шлака

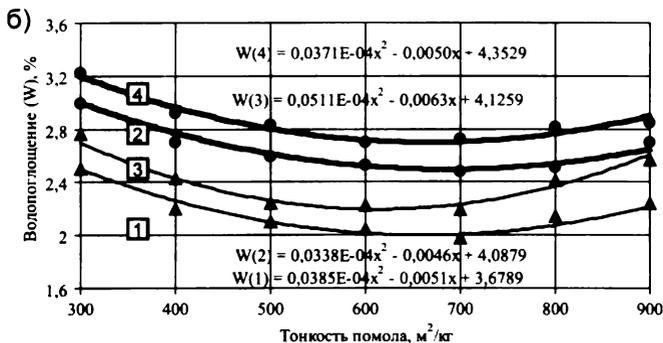
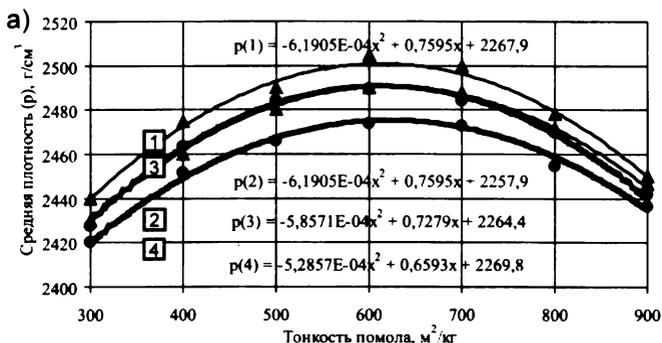


Рис. 3. Влияние удельной поверхности бездобавочного и с добавкой молотого БКК шлака ОХМК условий твердения на среднюю плотность и водопоглощение ШЩБ, изготовленного на водном р-ре

а - жидкого стекла  $\rho = 1,3 \text{ г/см}^3$ ;  $M_c = 1,5$ ; б - соды  $\rho = 1,15 \text{ г/см}^3$ ;

1 - ШЩВ0 после ТВО; 2 - ШЩВ0Д30 после ТВО; 3 - ШЩВ0 после 28 сут; 4 - ШЩВ0Д30 после 28 сут

- ШЩБ на вяжущих с удельной поверхностью  $600 \text{ м}^2/\text{кг}$  к 28 сут нормально-влажностного твердения набирают более высокую прочность, чем бетоны на вяжущих с дисперсностью  $900 \text{ м}^2/\text{кг}$ , при этом прочность у бетонов на КШЩВ становится выше, чем у бетона на бездобавочном вяжущем.

На рис. 3 представлены результаты исследования влияния тонкости помола шлака ШЩВ0 и смеси его и БКК ШЩВ0Д30 на среднюю плотность и водопоглощение бетонов на их основе, из анализа которых следуют выводы:

- введение 30% добавки БКК в состав КШЩВ значительно снижает среднюю плотность и повышает водопоглощение бетонов на их основе;

- наиболее высокая плотность и минимальное водопоглощение ШЩБ на бездобавочном и с добавкой БКК вяжущих наблюдается при тонкости их помола  $600-700 \text{ м}^2/\text{кг}$ , что и объясняет наиболее высокую прочность ШЩБ при такой дисперсности вяжущих;

- водопоглощение ШЩБ, подвергнутых тепло-влажностной обработке, ниже, чем у бетонов, твердевших при нормально-влажностных условиях;

- водопоглощение ШЩБ в зависимости от условий твердения, тонкости помола вяжущих и наличия в них добавки БКК колеблется в пределах от 3,2 до 2%, что характеризует их низкую открытую пористость и предопределяет их высокие показатели по водонепроницаемости и морозостойкости.

Проведенными исследованиями выявлено, что введение 30% добавки БКК в состав КШЩВ снижает высолообразование ШЩБ, в частности содержание свободной щелочи уменьшается на 18,1%.

Результаты исследований морозостойкости F и водонепроницаемости W, кинетики набора прочности и классов ШЩБ по прочности в зависимости от состава и тонкости помола вяжущих приведены в таблице.

Анализ приведенных в таблице данных показывает, что увеличение удельной поверхности шлаков и смеси шлаков с добавкой 30% боя керамического кирпича в пределах от  $300$  до  $900 \text{ м}^2/\text{кг}$  позволяет получать вяжущие и шлакощелочные бетоны на их основе – рядовые, высокопрочные, быстро- и особобыстротвердеющие классов по прочности от В20 до В80, марок по водонепроницаемости от W10 до W20, морозостойкости от F300 до F600.

№	Состав		БКК	$S_{уд}$	Прочность (МПа) ШЩБ в зависимости от продолжительности и условий твердения								Класс бетона	F	W
	Затворитель				м <sup>2</sup> /кг	1 сут		3 сут		28 сут		ТВО			
	вид	Кол-во (л/м <sup>3</sup> )	Кол-во (%)												
*	жидкое стекло $\rho = 1,3 \text{ г/см}^3$ $M_c = 1,5$	120	—	300-350	15,0	M100	34,6	M300	74,1	M700	75,8	M700	B50	800	25
1		125	30		—	0	12,1	M100	82,1	M800	85,3	M800	B55	600	20
2		125	—	600-700	26,2	M200	56,1	M500	96,2	M900	102,1	M1000	B70	600	20
3		130	30		20,0	M200	38,1	M300	106,1	M1000	112,2	M1100	B80	500	15
4		130	—	850-900	43,4	M400	60,8	M600	81,4	M800	80,6	M800	B55	500	15
5		135	30		38,6	M400	54,2	M500	88,9	M800	92,1	M900	B60	400	15
**	сода $\rho = 1,15 \text{ г/см}^3$	110	—	300-350	—	0	—	0	32,8	M300	34,1	M300	B20	600	20
6		115	30		—	0	—	0	39,7	M300	39,2	M300	B20	500	15
7		115	—	600-700	11,4	M100	20,3	M200	42,5	M400	44,6	M400	B25	500	15
8		120	30		—	0	16,2	M100	50,4	M500	50,6	M500	B30	400	10
9		120	—	850-900	26,5	M200	34,3	M300	34,2	M300	38,3	M300	B20	400	10
10		125	30		18,5	M100	31,5	M300	42,1	M400	41,3	M400	B25	300	10

**Библиографический список**

1. Глуховский В.Д., Пахомов В.А. Шлакощелочные вяжущие и бетоны. Киев.: Будивельник, 1978, 280 с.
2. Коновалов А. Вспомним о шлакощелочном вяжущем. Строительная газета, №29, 2006. - с. 5.
3. Хабибуллина Н.Р., Рахимов Р.З. Повышение эффективности шлакощелочных вяжущих и бетонов/Бетон и железобетон. - 2006. - № 5. - с.15-17.
4. Рахимов М.М., Хабибуллина Н.Р., Рахимов Р.З., Конюхова Т.П., Михайлова О.А., Соколов А.А. Вяжущее. Патент РФ на изобретение №2271343, опубл.10.03.2006. Бюлл. № 7.
5. Рахимов М.М., Хабибуллина Н.Р., Рахимов Р.З., Биккини-на Х.Г., Шарафутдинова Р.Х., Гатауллин Р.Ф. Способ получе-

6. Гатауллин Р.Ф., Хабибуллина Н.Р., Рахимов Р.З., Александров А.В., Морогов В.И., Рахимов М.М. Вяжущее. Патент РФ на изобретение №2287498, опубл. 20.11.2006. Бюлл. № 32.
7. Соколов А.А., Хабибуллина Н.Р., Рахимов Р.З., Рахимов М.М. Вяжущие (варианты). Патент РФ на изобретение №2296724, опубл. 10.04.2007. Бюлл. № 10.
8. ОСТ 67-11-84. Вяжущее шлакощелочное. Технические условия Минтяжстроя СССР.
9. Рекомендации по изготовлению шлакощелочных бетонов и изделий на их основе. - М. - НИИЖБ Госстроя СССР. - 1986. - 55 с.

**ДОЛГОВЕЧНОСТЬ**

В.Г. БОЙКО, канд. техн. наук, С.Ю. КАЛУГИН, В.Б. САМОХВАЛОВА, В.В. ШЕВЧЕНКО, инженеры (Приморская государственная сельскохозяйственная академия)

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНКРЕТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ МОРОЗОСТОЙКОСТИ БЕТОНА ПРИ ИСПЫТАНИЯХ БАЗОВЫМИ МЕТОДАМИ ГОСТ 10060.0-10060.2-95**

При испытаниях на морозостойкость базовыми методами [1] не предусмотрено определение конкретных значений морозостойкости, т.е. числа циклов M, при котором коэффициент морозостойкости  $K_N = K_M = R_0 / R_k = 0,95$ , где  $R_0$  – среднее значение прочности образцов, подвергнутых замораживанию и оттаиванию;  $R_k$  – среднее значение прочности контрольных образцов. Используя линейную интерполяцию, с достаточной точностью можно определить значение M лишь в том случае, если на промежуточных испытаниях  $K_N' \geq 0,95$ , а на итоговых  $K_N^0 \leq 0,95$ .

Для определения M по опытным значениям  $K_N$  и N необходимо иметь зависимость  $M = f(K_N, N)$ . При замораживании и оттаивании образцов происходят два процесса: процесс деструктивный, с образова-

нием макро- и микротрещин и процесс гидратации, в том числе и зерен цемента, оголившихся при возникновении трещин. В итоге разрушение начинается с поверхности, систематически углубляясь в толщу. Следовательно, коэффициент морозостойкости  $K_N$  показывает не изменение прочности, а изменение разрушающей нагрузки.

Представим  $K_N$  зависящим от поперечного сечения образца:

$$K_N = \frac{P_0}{P_K} = \frac{A_0}{A_K} = \frac{(a - 2h_K)^2}{2}, \tag{1}$$

где  $P_0, A_0, P_K, A_K$  - соответственно разрушающая нагрузка и площадь поперечного сечения после N циклов и контрольного до начала испытаний; a - размер ребра куба;  $h_K$  - толщина разрушившегося слоя за N циклов. При известной скорости разрушения  $\delta$ :

## Характеристики опытных образцов

№ серии	Состав бетона		Возраст на момент испытаний, сут	R, МПа ( $R_{K^{20}}$ )	M, циклов ( $K_M = 0,95$ )	
	Добавка, % от Ц	Состав бетона $\frac{П}{Ц} : \frac{Щ}{Ц} : \frac{В}{Ц}$			Ускоренный	Базовый
Первый базовый метод по ГОСТ 100.60.1-95						
1	СП1-+ПФМ -НЛК 0,8%	1:0,83:1,98:0,27	185	87,60	391	265
2	СП1-+ПФМ -НЛК 0,8%	1:0,89:2,05:0,28	180	66,50	283	167
3	СП1-+ПФМ -НЛК 0,8%	1:0,98:2,21:0,33	85	62,20	349	315
4	ПФМ -НЛК 0,8%	1:1,7:2,9:0,31	68	53,60	323	260
5	СП1-+ПФМ -НЛК 0,8%	1:0,8:1,96:0,31	80	64,40	252	400
6	СП1-+ПФМ -НЛК 0,8%	1:1,37:2,56:0,29	160	59,90	304	235
7	нет	1:2,03:2,58:0,43	28	35,60	194	120
Среднее		1:1,23:1,95:0,32	112	61,80	299	252
Второй базовый метод по ГОСТ 100.60.2-95						
8	Реламикс 0,8%	1:1,15:2,28:0,32	110	59,60	302	88
9	Реламикс 0,8%	1:0,82:1,96:0,32	77	52,90	246	230
10	ПФМ-НЛК+С-3 0,7%	1:0,89:2,05:0,32	28	50,80	265	290
11	ПФМ-НЛК 0,7%	1:1,2:2,35:0,35	28	47,50	254	330
12	ПФМ-НЛК 0,7%	1:0,87:2,05:0,32	28	51,70	197	163
13	ПФМ-НЛК 0,7%	1:1,23:2,35:0,30	28	57,40	280	590
14	Реламикс 0,8%	1:0,81:1,98:0,33	46	59,60	277	215
15	С-3	1:2,0:2,74:0,49	28	42,00	255	273
16	С-3	1:1,85:2,45:0,45	28	42,00	280	303
17	С-3	1:1,46:2,02:0,35	28	48,40	267	337
18	С-3	1:2,22:2,85:0,47	28	39,20	225	325
19	МК-2	1:2,24:2,77:0,53	28	22,80	136	50
20	нет	1:2,24:2,77:0,52	28	23,00	112	35
Среднее		1:1,58:2,19:0,42	43	49,70	258	269

Примечания: в бетоне образцов серий 4, 5, 6 применялся цемент Р-42,5 (КНР); 14 - Теплоозерский ПЦ500-ДОН; остальных - Спасский ПЦ500-ДО

$$h_K = \int_0^N \delta \cdot dN = \int_0^M \delta_1 \cdot dN + \int_M^N \delta_2 \cdot dN =$$

$$= \delta_1 M + \delta_2 (N - M), \quad (2)$$

где  $\delta_1$  - средняя скорость разрушения за один цикл на этапе испытаний от 0 до M циклов;  $\delta_2$  - то же, на этапе от M до N циклов.

Из формулы (1), принимая  $h_K = \delta_1 M$ , получим:

$$\delta_1 = \frac{a(1 - \sqrt{K_M})}{2M} \quad (3)$$

На втором этапе предположим:

$$\delta_2 = \frac{a}{2M} \quad (4)$$

Подставим  $\delta_1$  и  $\delta_2$  в (2):

$$h_K = \frac{Na}{2M} \left( 1 - \sqrt{K_M} \frac{M}{N} \right) = \frac{a}{2} (\xi - \sqrt{K_M}), \quad (5)$$

где  $\xi = N/M$  - относительное число циклов замораживания и оттаивания.

Подставив (5) в формулу (1), получим изменение величины разрушающей нагрузки:

$$K_N = (1 - \xi + \sqrt{K_M})^2. \quad (6)$$

Выражения (5) и (6) не отвечают начальным условиям. При числе циклов  $N = 0$ , т.е.  $\xi = 0$ , толщина

разрушившегося слоя  $h_K \neq 0$ , а  $K_N \neq 1,0$ . Поэтому зависимость (5) представим в следующем виде:

$$h_K = \frac{a}{2} \left[ \xi - \frac{\sqrt{K_M}(c+1)\xi}{c+\xi} \right], \quad (7)$$

где при любом значении  $c$   $\xi = 0$ ,  $h_K = 0$ ,  $K_N = 1$ . При  $\xi = 1$   $K_N = K_M = 0,95$ .

Экспериментально установлено, что разрушение поверхностного слоя начинается при числе циклов  $N = N_{cr}$ , с которого происходит резкое увеличение времени распространения ультразвука в контролируемом образце, соответствующее началу интенсивного разрушения. Тогда, приравняв к нулю  $dh/d\xi$ , получим квадратное уравнение, из которого определим  $c$ , подставляя  $\xi_{cr}$ . Согласно [2],  $\xi_{cr} = 0,5$ .

$$\frac{dh_K}{d\xi} = \frac{a}{2} \left[ 1 + \frac{(c+1)\sqrt{K_M}}{(c+\xi)^2} \right] = 0 \rightarrow$$

$$c^2(1 - \sqrt{K_M}) + c(2\xi_{cr} - \sqrt{K_M}) + \xi_{cr}^2 = 0 \quad (8)$$

Для упрощения примем  $\xi_{cr} = 0,5\sqrt{K_M}$  и, подставив в (8), получим:

$$c = \sqrt{\frac{\xi_{cr}^2}{1 - \sqrt{K_M}}} = \sqrt{\frac{0,25 \cdot 0,95}{1 - \sqrt{0,95}}} = 3,06254$$

Опытные значения  $\xi$  и  $K_N$ 

№ серии	M, циклы	Усл. обозн.	Опытные значения относительного числа циклов $\xi = N/M$ и $K_N = P_0/P_K$ , при числе циклов $N$										
			35	45	75	100	150	200	250	300	350	400	450
Первый базовый метод по ГОСТ 10060.1-95													
1	265	$\xi$					0,57	0,75	0,94	1,13	1,32	1,51	
		$K_N$					1,15	1,02	0,96	0,94	0,85	0,63	
2	167	$\xi$					0,90	1,22	1,50				
		$K_N$					1,0	0,88	0,72				
3	315	$\xi$						0,63	0,79	0,95	1,11	1,27	1,43
		$K_N$						1,15	1,08	0,96	0,83	0,82	0,70
4	260	$\xi$						0,77	0,96	1,15			
		$K_N$						1,02	1,04	0,65			
5	400	$\xi$					0,38		0,63	0,75	0,88	1,0	1,13
		$K_N$					1,1		1,19	1,15	1,02	0,95	0,92
6	235	$\xi$					0,64	0,85	1,06	1,28			
		$K_N$					1,07	1,02	0,92	0,83			
7	120	$\xi$				0,83	1,25						
		$K_N$				1,03	0,83						
Второй базовый метод по ГОСТ 10060.2-95													
8	88	$\xi$			0,85	1,14	1,71						
		$K_N$			1,07	0,92	0,63						
9	230	$\xi$				0,43	0,65	0,87	1,09				
		$K_N$				1,16	1,14	1,02	0,90				
10	290	$\xi$				0,37		0,67		1,03	1,29	1,47	
		$K_N$				1,08		1,21		0,94	0,86	0,61	
11	330	$\xi$				0,30	0,46	0,61		0,91	1,06		
		$K_N$				1,15	1,22	1,17		1,10	0,85		
12	163	$\xi$	0,21	0,28	0,46		0,92	1,27	1,53				
		$K_N$	1,04	1,08	1,12		1,03	0,67	0,42				
13	590	$\xi$		0,08	0,13		0,25			0,51			
		$K_N$		1,08	1,09		1,18			1,18			
14	215	$\xi$						0,47	0,70	0,93	1,16		
		$K_N$						1,12	1,19	0,98	0,80		
15	273	$\xi$						0,73	0,92	1,10			
		$K_N$						1,03	1,09	0,93			
16	303	$\xi$						0,66	0,83	1,01			
		$K_N$						1,18	1,16	0,93			
17	337	$\xi$						0,59	0,74	0,89	1,04	1,19	1,34
		$K_N$						1,18	1,17	1,13	0,88	0,79	0,71
18	325	$\xi$						0,62	0,77	0,92	1,08	1,23	1,38
		$K_N$						1,17	1,22	1,01	0,89	0,79	0,69
19	50	$\xi$	0,70	0,90	1,50								
		$K_N$	1,10	0,99	0,75								
20	35	$\xi$	1,0	1,29	2,14								
		$K_N$	0,95	0,72	0,34								

Подставим значение  $c$  в (7), а затем (7) в (1).  
Окончательно получим:

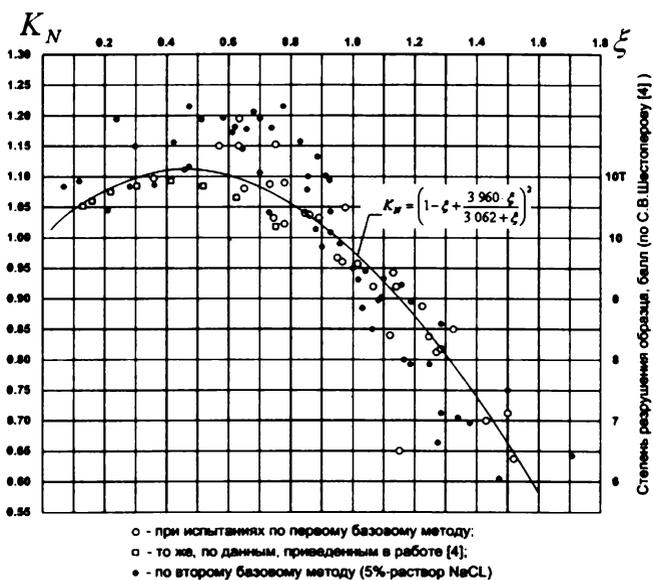
$$K_N = \left( 1 - \xi + \frac{3,96\xi}{3,062 + \xi} \right)^2 \quad (9)$$

Из формулы (9), учитывая, что  $\xi = N/M$ , определим морозостойкость:

$$M = \frac{N}{1,898 - \sqrt{K_N} \pm \sqrt{\left( \frac{1,898 - \sqrt{K_N}}{2} \right)^2 + 3,062(1 - \sqrt{K_N})}} \quad (10)$$

## Определение морозостойкости по степени разрушения образцов

Показатели	При количестве циклов $N$ табл. X.3 [4]						
	120	198	295	349	427	539	567
Содержание в м <sup>3</sup> бетона: воды – 180 л, цемента – 500 кг							
Степень повреждения образца, балл	9-10 т	9-9 т	8	7	3-6	0-3	0-3
Средний балл для определения $\xi$ и $K_N$	10 т	9,5	8	7	4,5	1,5	1,5
Относительное количество циклов $\xi$ по рисунку	0,58	1,0	1,25	1,41	1,86	2,32	2,32
Морозостойкость (в циклах) $M = N/\xi$ при $K_N = K_M = 0,95$	207	208	236	226	230	232	244
Содержание в м <sup>3</sup> бетона: воды – 130 л, цемента – 325 кг							
Степень повреждения образца, балл	9-10 т	8-9	7-9	6-9	1-7	1-4	0-3
Средний балл для определения $\xi$ и $K_N$	10 т	9,0	8	7,5	4	2,5	1,5
Относительное количество циклов $\xi$ по рисунку	0,56	1,09	1,25	1,34	1,86	2,12	2,32
Морозостойкость (в циклах) $M = N/\xi$ при $K_N = K_M = 0,95$	207	182	236	238	230	254	244

Зависимость  $K_N - \xi$  опытных образцов-кубов

Для экспериментального подтверждения полученных зависимостей (9) и (10) в научно-производственной лаборатории качества строительного производства ПГСХА проведены испытания 20 серий образцов-кубов 10×10×10 см. Каждая серия состояла из 18 образцов.

В процессе испытаний линейной интерполяцией определяли  $M$ , вес образцов. Результаты определения морозостойкости  $M$  структурно-механическим методом по ГОСТ 10060.4-95 и базовым (линейной интерполяцией) приведены в табл. 1 и 2. В процессе испытаний степень повреждения оценивали по 10-бальной шкале, предложенной в [4].

Из формулы (10) следует, что морозостойкость  $M$  может иметь два значения. Для определения действительного значения  $M$  необходимо установить, что число циклов  $N \leq N_{cr} (\xi \leq \xi_{cr})$ , либо  $N \geq N_{cr} (\xi \geq \xi_{cr})$ . При испытаниях по методике ГОСТ достаточно сравнить опытные значения  $K_N$  после

промежуточных и окончательных циклов. Если  $K_N^0 \geq K_N^i$ , то  $\xi \leq \xi_{cr}$ , при  $K_N^0 \leq K_N^i$   $\xi > \xi_{cr}$ .

Чтобы избежать выполнения вычислений по (10),  $\xi$  определяется по графику, приведенному на рисунке. Из него видно, что независимо от возраста образцов, начальной прочности, характеристик примененных материалов и методов испытаний существует достаточно тесная зависимость между  $K_N$  и относительным числом циклов  $\xi$ . Установлено, что при  $\xi > \xi_{cr}$ , используя зависимость  $K_N - \xi$ , морозостойкость  $M$  можно определить по степени разрушения, оцениваемой по 10-бальной шкале, установленной в [4]. В табл. 3 приведен пример такого определения морозостойкости, из которой видно, что при различном числе циклов морозостойкость остается практически одинаковой.

## Выводы

Зависимость  $M = f(N, K_N)$  (10) существует для разных составов бетона при испытаниях по базовым методам ГОСТ10060.0 – 10060.2-95 и позволяет определить конкретные значения морозостойкости при различном числе циклов  $N$ . Установлена возможность определения морозостойкости по степени разрушения. Таким образом, количество испытываемых образцов может быть уменьшено за счет контрольных и испытываемых на промежуточном этапе.

## Библиографический список

1. ГОСТ10060.0-95 - ГОСТ10060.4-95. Бетоны. Методы определения морозостойкости.
2. ГОСТ 26134-84 Бетоны. Ультразвуковой метод определения морозостойкости.
3. Сизов В.П., Подгорнов Н.И., Башлыков Н.Ф. Оценка методики проведения испытаний бетона на воздействие климатических температур // Бетон и железобетон. - 1990. - № 7. - с. 33-35.
4. Шестоперов С.В. Технология бетона. Учебное пособие для вузов. М., "Высшая школа" - 1977. - 432 с., ил.

*В.Г. НАЗАРЕНКО, д-р техн. наук, проф., М.Н. ТВОРОГОВА, канд. техн. наук, доц., П.Н. ЛУКАНЦОВ, асп. (Московская государственная академия коммунального хозяйства и строительства)*

## О ПОСТРОЕНИИ ФУНКЦИЙ СТАРЕНИЯ БЕТОНА

Опираясь на опыты [1], в которых установлено, что деформации ползучести  $S(t, \tau) = \frac{\varepsilon_c(t, \tau)}{\beta(\tau)}$  (удельные по отношению к начальному относительному уровню напряжений  $\beta(\tau) = \frac{\sigma(\tau)}{R_b(\tau)}$ ) практически не зависят от возраста бетона, т.е. инвариантны относительно начала нагружения, в [5] показано, что три механические характеристики бетона (мера прочности  $\frac{1}{R_b(\tau)}$ , упруго-мгновенные деформации  $\frac{1}{E_b(\tau)}$  и ползучести  $C(t, \tau)$ ) пропорциональны значению одной общей функции старения  $\Omega(\tau)$ , выражающей изменения рассмотренных показателей для любого возраста бетона  $\tau$  по отношению к эталонному возрасту  $\tau_1 = 28$  сут. Этот факт согласуется с физическим смыслом, если вспомнить, что процесс изменения указанных величин есть следствие одной причины – твердения бетона [2].

Очевидно, эти рассуждения можно перенести и на другие механические показатели бетона, зависящие от его старения. Рассматривая процесс увеличения начального модуля деформаций бетона во времени как следствие некоторой физико-химической реакции твердения, В.М. Бондаренко [3] получил для случая постоянной температуры реакции выражение функции старения

$$\Omega(\tau)^{-1} = 1 - e^{-k\tau},$$

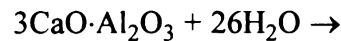
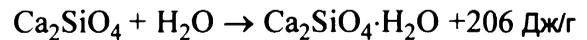
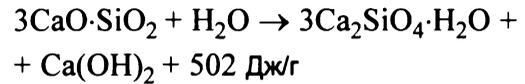
где  $k$  - константа скорости химической реакции. При этом принимается, что скорость последней пропорциональна концентрации реагирующих веществ

$$-d(A_0 - A_t)/d\tau = k(A_0 - A_t).$$

Здесь  $A_0$  - полная концентрация реагирующих веществ;  $A_t$  - концентрация прореагировавших веществ в момент времени  $t$ .

Впоследствии в [4] это положение было перенесено на меру ползучести и глубину коррозии. Константа скорости химической реакции не зависит от концентрации, но зависит от температуры.

Ищем форму функций старения на анализе кинетики химических реакций гидратации цемента в бетоне. Безводные минералы клинкера при реакции с водой в результате гидратации превращаются в гидросиликаты, гидроалюминаты и гидроферриты кальция [7]:



Образовавшийся  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  под действием  $\text{CO}_2$  воздуха постепенно превращается в  $\text{CaCO}_3$ , гидроалюминаты кальция с гипсом в присутствии воды дают двойные основные сульфаты, например  $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{OH})_{12}(\text{SO}_4)_3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{Ca}_4\text{Al}_2(\text{OH})_{12}\text{SO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ . При получении бетона образовавшийся  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  с  $\text{CO}_2$  воздуха и  $\text{SiO}_2$  превращается в очень прочную массу, состоящую из карбонатов и силикатов кальция. Они и определяют физико-механические свойства бетона. Последние, очевидно, напрямую зависят от количества прогидратированного вещества, которое, в свою очередь, зависит от скорости и времени гидратации.

Основными показателями химической кинетики являются зависимости концентраций реагирующих веществ и продуктов реакции от времени. Скорость реакции может быть выражена как скорость изменения концентрации любого из этих веществ. Часто скорость реакции пропорциональна концентрации в некоторой степени, которая может быть определена стехиометрией реакции. Приведенные выше реакции гидратации имеют следующие стехиометрии:



где  $A$  есть реагирующее вещество  $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  в первой,  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$  во второй и  $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  в третьей реакции;  $B$  - вода;  $C$  и  $D$  - продукты гидратации.

Для случая (а) скорость реакции может выражаться уравнениями:

$$-d[A]/dt = k_1[A] \cdot [B]$$

$$-d[A]/dt = k_2[A]^3 \cdot [B]$$

$$-d[A]/dt = k_3[A] \cdot [B]^{1/3}$$

Для случая (б):

$$-d[A]/dt = k_4[A]$$

$$-d[A]/dt = k_5[A] \cdot [B]$$

Для случая (с):

$$\begin{aligned} -d[A]/dt &= k_6[A] \cdot [B] \\ -d[A]/dt &= k_7[A] \cdot [B]^2 \\ -d[A]/dt &= k_8[A]^{1/2} \cdot [B] \end{aligned}$$

В выражениях скоростей величины в квадратных скобках обозначают концентрации веществ. Для упрощения задачи выбора подходящего выражения для скорости реакции используем метод выделения Освальда. Он основан на приближении о небольшом изменении концентрации реагирующего вещества в ходе реакции, если оно присутствует в значительном избытке. Таким веществом в реакции гидратации является вода. Ее в бетонной смеси всегда больше потребного для реакции количества из-за необходимости обеспечения достаточной удобоукладываемости. Если скорость выражается законом

$$-d[A]/dt = k_1[A] \cdot [B]$$

и  $B$  присутствует в значительном избытке, то концентрация  $[B]$  будет практически постоянной и может быть включена в константу скорости  $k'_1 = k_1 \cdot [B]$ . Тогда закон скорости упрощается до  $-d[A]/dt = k'_1[A]$ . После таких упрощений количество уравнений сокращается до трех:

$$-d[A]/dt = k_1[A]; \quad (d)$$

$$-d[A]/dt = k_2[A]^2; \quad (e)$$

$$-d[A]/dt = k_3[A]^{1/2}. \quad (f)$$

Проинтегрируем полученные выражения, разделив переменные.

Для случая (d):

$$\int_{A_0}^{A_t} [A]^{-1} d[A] = k_1 \int_0^t dt \text{ дает } -(\ln[A_t] - \ln[A_0]) = k_1 t$$

или  $\ln([A_t]/[A_0]) = \exp(-k_1 t)$ ,

$$\text{откуда } [A_t] = [A_0] \exp(-k_1 t) \quad (d)$$

Принимая, что свойства бетона пропорциональны количеству прореагировавшего клинкера, получим функцию изменения его свойств как отношение этого количества к его первоначальной концентрации и назовем ее, как это принято в теории ползучести, функцией старения:

$$\Omega(t)^{-1} = ([A_0] - [A_t])/[A_0] = 1 - \exp(-k_1 t).$$

Это выражение впервые было получено В.М. Бондаренко [3] для функции старения начального модуля деформаций бетона. Впоследствии он обобщает это выражение [4] при  $m = 1$  на меру ползучести и глубину коррозии.

Для случая (e):

$$\int_{A_0}^{A_t} [A]^{-3} d[A] = k_2 \int_0^t dt \text{ дает } [A_t] = [A_0] / \sqrt{1 + 2k_2 t [A_0]^2}$$

и тогда  $\Omega(t)^{-1} = 1 - 1/\sqrt{1 + 2k_2 t [A_0]^2}$ . Обозначив  $k = 2k_2$ , окончательно получим  $\Omega(t)^{-1} = 1 - 1/\sqrt{1 + kt[A_0]^2}$ .

Для случая (f):

$$\int_{A_0}^{A_t} [A]^{-1/2} d[A] = k_3 \int_0^t dt \text{ дает } [A_t] = (\sqrt{[A_0]} - k_3 t/2)^2$$

и тогда  $\Omega(t)^{-1} = 1 - (\sqrt{[A_0]} - k_3 t/2)^2/[A_0]$ . Обозначив  $k = k_3/2$ , окончательно получим  $\Omega(t)^{-1} = 1 - (\sqrt{[A_0]} - kt)^2/[A_0]$ .

Таким образом, имеем три возможные формы для функции старения

$$\Omega(t)^{-1} = 1 - \exp(-k_1 t), \quad (d)$$

$$\Omega(t)^{-1} = 1 - 1/\sqrt{1 + kt[A_0]^2}, \quad (e)$$

$$\Omega(t)^{-1} = 1 - (\sqrt{[A_0]} - kt)^2/[A_0]. \quad (f)$$

Среди них нужно выбрать одну, которая более полно удовлетворяет опытным данным, зависящим от вида бетона, концентрации вяжущего и, возможно, от других факторов (вида заполнителя, наличия химических добавок, технологических особенностей и пр.). Под этим углом зрения открывается широкое поле для исследований с целью теоретического обобщения накопленных сегодня эмпирических знаний о свойствах бетона.

Первая из функций старения имеет всего один параметр  $k_1$ . Две других содержат дополнительно второй параметр – начальную концентрацию  $[A_0]$ , которая, видимо, зависит от количества вяжущего и его активности. По этой причине они могут быть более точными. Полученные функции старения основаны на стехиометрии приведенных выше реакций гидратации. Не исключено, что при этом пропущены другие стехиометрии, соответствующие другим бетонам. Полезно рассмотреть общий случай  $-d[A]/dt = k[A]^n$ , где  $n$  – тоже параметр (любое число, подбираемое из эксперимента). Интеграл этого уравнения имеет вид  $[A_0]^{-(n-1)/(-n+1)} - [A_t]^{-(n-1)/(-n+1)} = kt$ . Подбор параметров в этом случае более сложен, однако имеющиеся в нашем распоряжении вычислительные средства позволяют легко преодолеть эти сложности.

## Библиографический список

1. Александровский С.В., Соломонов В.В. Зависимость деформаций ползучести стареющего бетона от начального уровня напряжений. Межотраслевые вопросы строительства. Отечественный опыт. Реферативный сборник, - 1972, вып. 6.
2. Бондаренко В.М. Некоторые вопросы нелинейной теории железобетона. - Харьков, 1968.
3. Бондаренко В.М., Бондаренко С.В. Инженерные методы нелинейной теории железобетона. - М.: Стройиздат, 1984, 183 с.
4. Бондаренко В.М. Некоторые фундаментальные вопросы развития теории железобетона. V межвузовская конференция, - МГАХиС, Москва, 2009.
5. Назаренко В.Г. Развитие основ теории расчёта железобетонных конструкций с учётом особенностей режимного нагружения, дис. на соискание уч. степ. д-ра техн. наук, - ВЗИСИ, Москва, 1989.
6. Spann Beton. Richtlinien für Bemessung und Ausführung. Von H. Rüsçh, Verlag Von Wilhelm Ernst und Sohn. - Berlin, 1954.
7. Райхель В., Конрад Д. Бетон: В 2-х ч. Ч. 1. Свойства. Проектирование. Испытание. - М.: Стройиздат, 1979. С. 33. Пер. с нем./Под ред. В. Б. Ратинова.

*Л.И. ДВОРКИН, О.Л. ДВОРКИН, доктора техн. наук, профессора (Национальный ун-т водного хозяйства и природопользования, г. Ровно, Украина)*

## АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ ЗАКОНА СТВОРА ТЕОРИИ ИСК

Фундаментальной базой бетоноведения являются теоретические представления о взаимосвязи параметров структуры и состава бетона с его свойствами.

Структурная теория бетона начиная с 19 столетия разрабатывалась многими исследователями, однако, учитывая сложность бетона как полиструктурной физико-химической системы, непрерывно изменяющейся во времени и активно взаимодействующей с окружающей средой, она еще далека от завершения. Определенный положительный вклад в развитие структурной теории бетона внесла теория искусственных строительных конгломератов (ИСК), основы которой разработаны проф. И.А.Рыбьевым [1, 2].

К главным закономерностям этой теории следует отнести закон створа, утверждающий, что оптимальной структуре соответствует комплекс экстремальных значений свойств искусственных конгломератов, к которым можно отнести бетон. Отношение к этому закону различных исследователей нельзя назвать однозначным, оно колеблется от его полного признания до полного отрицания. В обоих случаях всесторонне не учитывается совокупность принимаемых исходных материаловедческих предпосылок, что часто приводит к недостаточно объективным или ошибочным выводам.

Позитивное значение закона створа для бетоноведения заключается в том, что он, во-первых, констатирует объективные взаимосвязи различных свойств бетона как между собой, так и с соответствующими параметрами структуры и состава и, во-вторых, утверждает необходимость совпадения наилучших значений показателей свойств при некоторых определенных значениях структурных параметров.

Вместе с тем, недостаточная убедительность принимаемых в теории ИСК представлений об "оптимальной структуре" и постулирование обязательной экстремальности и совпадения экстремумов для всего комплекса свойств бетона при определенной его структуре снижают значение закона створа как общей закономерности структурной теории.

В теории ИСК оптимальной называют структуру с равномерно распределенными в ней частицами (фазами, компонентами, порами и др.), низким содержанием дефектов, непрерывной прослойкой пространственной сетки матрицы затвердевшего вяжущего при минимально возможном фазовом (для бетона - водоцементном) отношении. Критерием оптимизации структуры, по И.А.Рыбьеву, является достижение комплекса экстремальных значений свойств.

Вместе с тем существует достаточно много технических и технико-экономических критериев оптимизации структуры и состава бетона. Некоторые из них приведены в табл. 1.

Таблица 1  
Основные критерии оптимальности при проектировании составов и структуры бетона

Показатель свойства (комплекса, соотношения свойств) бетонной смеси или бетона ( $P_i$ ): $P_i \rightarrow \max(\min)$ , где $P_i$ - подвижность бетонной смеси, прочность, морозостойкость, усадка бетона и др.
Отношение показателей свойства для анализируемого бетона ( $P_i$ ) и бетона эталонного состава (структуры) ( $P_0$ ): $P_i/P_0 \rightarrow \max(\min)$ .
Отношение показателей свойства бетона ( $P_i$ ) к удельному расходу материального или энергетического ресурса, необходимого для его изготовления ( $X$ ): $P_i/X \rightarrow \max$ , где $X$ - расход цемента, заполнителей, добавок, тепловой, электрической энергии и др.
Удельный расход ресурса (на 1 м <sup>3</sup> бетонной смеси, конструкции, сооружения): $X \rightarrow \min$ .
Отношение удельного расхода ресурса к показателю свойства бетона: $X/P_i \rightarrow \min$ .
Удельный стоимостной показатель*: $C \rightarrow \min$ , где $C$ - стоимость 1 м <sup>3</sup> бетона, конструкции, сооружения; стоимость ресурсов; прибыль; приведенные затраты и др.
Отношение удельных стоимостных показателей для анализируемого бетона и бетона эталонного состава (структуры) ( $C_0$ ): $C/C_0 \rightarrow \min$ .
Отношение удельных стоимостных показателей и показателей свойств (или наоборот)*: $C/P_i \rightarrow \min$ (или $P_i/C \rightarrow \max$ ).

Примечание: \* - Критерий оптимальности рассматривается при обязательном обеспечении заданных показателей свойств.

Наиболее характерными при оптимизации структуры бетона являются задачи, предполагающие достижение не абсолютного, а условного экстремума значения критерия при заданных ограничениях (например, минимально возможной объемной концентрации цементного камня при нормируемых значениях прочности бетона, удобоукладываемости бетонной смеси

и др.). В теории ИСК такие структуры выделяют из оптимальных и называют рациональными. Очевидно, при правильном формулировании условий оптимальности оптимальные структуры всегда являются рациональными. Качественные признаки оптимальных структур бетона также определяются как предъявляемым комплексом требований к нему, так и условиями оптимальности. Например, для морозостойких бетонов оптимальная структура должна характеризоваться необходимым соотношением условно замкнутых и открытых пор. Количественные значения параметров структуры бетона зависят от нормируемых показателей свойств, особенностей исходных материалов, режима твердения, добавок и др. (рис. 1).

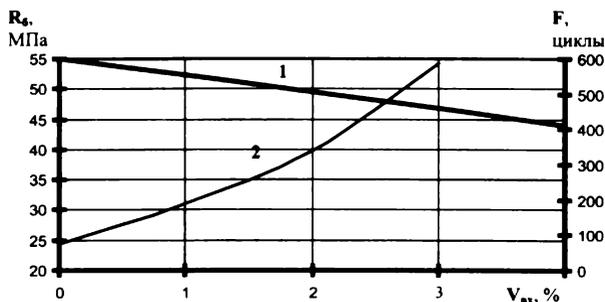


Рис. 1. Зависимости между прочностью бетона (\$R\_d\$) и объемом вовлеченного воздуха \$V\_{ax}\$ (1), между морозостойкостью бетона (\$F\$) и объемом вовлеченного воздуха (2)

Разнообразие возможных вариантов постановки задач оптимизации обуславливает и многообразие оптимальных структур, отличающихся качественными особенностями, количественными соотношениями основных фаз, межфазными взаимодействиями. Проектирование оптимальной структуры бетона в конечном счете достигается проектированием его оптимального состава.

Закон створа предполагает в качестве ключевого параметра, определяющего оптимальность структуры строительного конгломерата, его фазовое отношение Ф/С. Минимизация его, в соответствии с теорией ИСК, направлена на максимально возможное увеличение плотности матричной составляющей конгломерата и соответствующее улучшение его свойств. Для цементных бетонов фазовым служит водоцементное отношение (В/Ц), и оптимизация структуры при В/Ц → min возможна и во многих случаях целесообразна при необходимости достижения максимально возможных значений прочностных и других однозначно связанных с ними свойств.

Однако при минимизации расхода цемента (Ц → min) и обеспечении заданных проектных показателей свойств бетона В/Ц, как правило, остается постоянным или может даже повышаться (например, за счет вовлеченного воздуха при нормировании прочности и морозостойкости бетона). При этом задачи оптимизации структуры и соответственно состава бетона реализуются путем выбора цемента и других исходных материалов смесей с пониженной водопотребностью, введения добавок, подбора зернового состава заполнителей и др.

Минимизацию В/Ц при сохранении непрерывности матричной сетки нельзя считать универсальным признаком оптимальных структур и при необходимости достижения максимального (минимального) значения показателей свойств, определяемых плотностью цементного камня. Для бетонов увеличение последней достигается не только при В/Ц → min, но и при В/Ц = const, когда возрастает степень гидратации цемента α. Это следует из расчетного выражения плотности цементного камня [3] X:

$$X = \frac{k_r V_{y.c} \alpha}{V_{y.c} \alpha + B/C} \approx \frac{0,647 \alpha}{0,319 \alpha + B/C}, \quad (1)$$

где \$k\_r\$ - коэффициент увеличения объема продуктов гидратации цемента (\$k\_r = 2,09...2,2\$); \$V\_{y.c}\$ - удельный объем цемента (\$V\_{y.c} = 1/\rho\_c = 0,319\$ см<sup>3</sup>/г).

Изменение величины α достигается выбором вида цемента, добавок, режима твердения и др. Для ряда свойств бетона плотность цементного камня и соответственно В/Ц не является определяющим или является не единственным определяющим структурным параметром. Этот вывод иллюстрируется анализом известных расчетных зависимостей, некоторые из которых приведены в табл. 2.

Таблица 2  
Расчетные зависимости свойств бетонной смеси и бетона

Свойства бетонной смеси и бетона	Расчетная формула	Условные обозначения
Удобоукладываемость бетонной смеси [4]	$K = \frac{C}{B^k}$	C - константа; B - водосодержание смеси; K - показатель степени (K ≈ 8,5)
Водопотребность бетонной смеси [5]	$B = 60 + 40K + 0,07S_{щ} + 5B_n + 1,5H.G$	OK - осадка конуса, см; \$S_{щ}\$ - удельная поверхность щебня, м <sup>2</sup> /м <sup>3</sup> ; \$B_n\$ - водопотребность песка, %; H.G - нормальная плотность цемента, %
Мера ползучести бетона [6]	$C_m = \frac{KB}{R_{сж}}$	K - константа; B - расход воды, л/м <sup>3</sup> ; \$R_{сж}\$ - прочность бетона
Усадка бетона [6]	$\epsilon_{yc} \cdot 10^6 = 0,125B\sqrt{B}$	
Модуль упругости бетона [6]	$E = \frac{5,3R_{сж}}{65m_k + R_{сж}}$	\$m_k\$ - относительное массовое содержание цементного камня в бетоне

В задачах проектирования оптимальных составов бетона с комплексом различных свойств (многопараметрическое проектирование составов бетона) приходится учитывать, что ряд свойств бетона неоднозначно связан с прочностными свойствами и, следовательно, с В/Ц, а ряд свойств бетона определяется другими параметрами состава.

Под створом, как известно, в технической терминологии понимается некоторое предсказуемое поло-

жение объектов на одной прямой линии. В первой редакции закона створа [1] утверждалось, что оптимальной структуре соответствует комплекс наиболее благоприятных показателей строительных и эксплуатационных свойств конгломерата. С такой самой общей формулировкой можно согласиться. Действительно, свойства строительных конгломератов, в том числе и бетона, являются следствиями или "откликами" их структуры, и оптимизация структуры всегда направлена на достижение комплекса наиболее благоприятных свойств. При этом, однако, нельзя забывать, что под комплексом "наиболее благоприятных свойств" следует понимать комплекс наиболее приемлемых показателей свойств материалов при заданных условиях оптимальности. Например, при необходимости достижения наиболее высокой прочности бетона значения комплекса "наиболее благоприятных" показателей других свойств могут отличаться от таковых, при которых, например, стремятся при оптимизации структуры бетона из условия достижения максимальной морозостойкости. Этот вывод основывается на неодинаковом уровне корреляции связи свойств бетона с различными параметрами его структуры.

В своем более позднем определении закона створа И.А.Рыбьев заменил понятие "наиболее благоприятные" свойства понятием "экстремальные значения" свойств [2].

Экстремум показателей ряда свойств бетона может быть обусловлен, например, некоторым минимально возможным значением В/Ц, при котором достигается минимальная и в то же время непрерывная прослойка матричной фазы (цементного камня) на зернах заполнителя. Для бетона это возможно, как правило, лишь в тех случаях, когда не нормируется удобоукладываемость бетонной смеси, определяющая толщину прослойки цементного камня.

Однако экстремальность при изменении В/Ц и объемного соотношения цементного камня и заполнителей для свойств бетона наблюдается или при определенных условиях (предельная для заданного способа уплотнения удобоукладываемость смеси и др.) или вообще не имеет места. Например, усадка бетона и его экзотермия непрерывно уменьшаются с увеличением объемного содержания заполнителей ( $V_3$ ). Показатели этих свойств можно рассчитать по формулам [6]:

$$\varepsilon_{yc} = \varepsilon_{yc}^{ч.к} (1 - V_3)^n, \quad (2)$$

$$Q_\tau = q_\tau \Pi$$

где  $\varepsilon_{yc}^{ч.к}$  - усадка цементного камня, мм/м;  $Q$  - экзотермия бетона, кДж/м<sup>3</sup>;  $q_\tau$  - удельное тепловыделение цемента, кДж/кг;  $n$  - показатель степени.

При оптимальной структуре материала на одной прямой, т.е. в створе, оказываются максимально (минимально) возможные при заданных условиях, но не обязательно экстремальные значения комплекса свойств, однозначно связанных (вид исходных мате-

риалов, режим твердения и др.) с определенным структурным параметром. В качестве структурных, наряду с В/Ц, могут выступать и другие параметры (рис. 2).

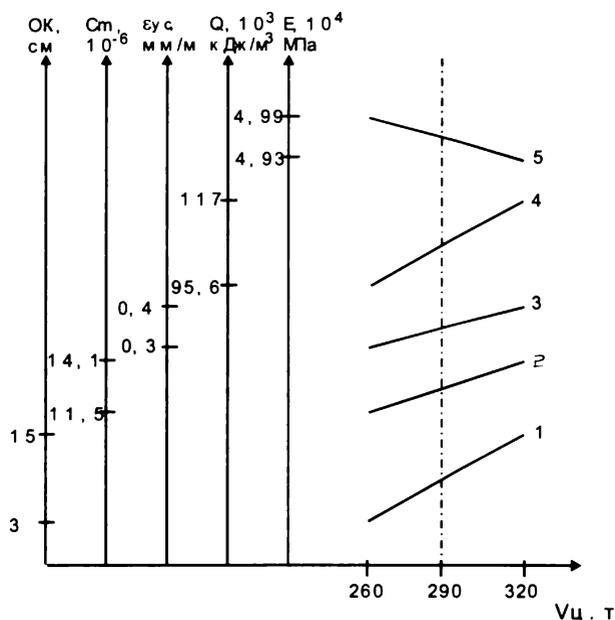


Рис. 2. Пример створа возможных значений свойств бетона в зависимости от объема цементного теста  $V_{ц.т.}$  при В/Ц=0,7  
1- ОК - осадка конуса; 2 -  $C_t$  - мера ползучести; 3 -  $\varepsilon_{yc}$  - усадочные деформации; 4 - Q - экзотермия бетона; 5 - E - модуль упругости

Примечания: 1. Приведенные графики получены по известным расчетным формулам [7, 8].

2. Портландцемент М500; песок средний кварцевый; щебень гранитный 5-20 мм

Как известно из курса математического анализа [9], понятия экстремума и максимума (минимума) функции не идентичны. В точке экстремума производная функции или равна нулю или не существует, а в точке максимума или минимума функция имеет наибольшее или наименьшее значения в некоторой окрестности данной точки.

Все свойства бетона, очевидно, можно сгруппировать не в один глобальный створ показателей, изменяющихся относительно В/Ц, а в некоторый ряд створов, каждый из которых объединяет свойства, определяемые соответствующим показателем структурных параметров.

## Выводы

1. Применимость закона створа требует уточнения для конкретных задач условий оптимизации структуры.
2. Наряду с водоцементным отношением при оптимизации структуры бетона необходим учет ряда других структурных параметров. Число возможных створов определяется видом структурных параметров, однозначно связанных с данной группой свойств бетона.
3. При оптимальной структуре бетона "в створе" оказываются максимально (минимально) возможные при данных условиях, но не обязательно экстремальные, значения комплекса свойств.

1. Рыбьев И.А. Строительные материалы на основе вяжущих веществ. - М.: Высш. шк., 1978. - 309 с.
2. Рыбьев И.А. и др. Общий курс строительных материалов. - М.: Высшая школа, 1987, 584 с.
3. Powers T. The physical structure of Cement and Concrete.// Cement and Lime Manufacture. V. 29, №2, 1956. - 270 p.
4. Сорокер В.И., Довжик В.Г. Жесткие бетонные смеси в производстве сборного железобетона. - М.: Стройиздат, 1964. - 206 с.
5. Грушко И.М., Ильин А.Г., Рашевский С.Т. Прочность бетонов на растяжение. - Харьков: Изд-во ХГУ, 1973. - 155 с.
6. Берг О.В., Щербаков Е.Н., Писанко Г.Н. Высокопрочный бетон. - М.: Стройиздат, 1971. - 208 с.
7. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Основы бетоноведения. - Санкт-Петербург: Строй Бетон, 2006. - 692 с.
8. Баженов Ю.М. Технология бетона. - М.: Высшая школа, 1987. - 449 с.
9. Бермант А.Ф., Араманович И.Г. Краткий курс математического анализа. - М.: Стройиздат, 1971. - 208 с.

## СТАНДАРТЫ И НОРМАТИВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ

*А.М. ШЕЙНИН, С.В. ЭККЕЛЬ, кандидаты техн. наук (ОАО СоюздорНИИ)*

### О НОРМАТИВНЫХ ТРЕБОВАНИЯХ К БЕТОНУ ДОРОЖНЫХ И АЭРОДРОМНЫХ ПОКРЫТИЙ (К ПЕРЕСМОТРУ ГОСТ 26633-91)

В настоящее время требования к тяжёлому и мелкозернистому бетонам определяет ГОСТ 26633-91 с Изменениями № 1 и № 2. При этом второе затрагивает основополагающие требования к бетону покрытий автомобильных дорог и аэродромов (к дорожному бетону).

В отличие от положений ГОСТ 26633-91, существовавших до принятия Изменения №2, а также от требований европейского стандарта EN 206-1 "Бетон. Часть 1. Общие технические требования, производство и контроль качества" новая редакция ГОСТ 26633-91 с Изменением №2 устанавливает требования к дорожному бетону в зависимости от удобоукладываемости бетонной смеси, от того, относится ли она к группе подвижных или жёстких смесей по ГОСТ 7473-94 (табл. 1).

Для дальнейшего обсуждения важно отметить, что в настоящее время главным в обеспечении нормативного срока службы покрытий (не менее 20-30 лет) в условиях совместного воздействия переменного замораживания и оттаивания и антигололёдных реагентов при эксплуатации дорог и аэродромов является обязательное получение дорожного бетона высокой морозостойкости. Стандарт EN 206-1 классифицирует такие условия эксплуатации с индексом XF4 (горизонтальные поверхности дорог и мостов, попеременное замораживание и оттаивание, сильное водонасыщение с применением антиобледенителей). В аналогичных условиях при эксплуатации находится также бетон бортового камня, тротуарной плитки, сборных дорожных и аэродромных плит, мостовых конструкций и других сооружений транспортного и гидротехнического назначения.

Для всех вышеуказанных конструкций, как показали известные многолетние исследования СоюздорНИИ, ЦНИИС, НИИЖБ, 26 ЦНИИ МО, ВНИИГ, МАДИ, МИИТ, ЛИИЖТ и других организаций, для обеспечения высокой гарантированной морозостойкости бетона необходимым техническим решением является обязательное применение воздухововлека-

ющих или газообразующих добавок с одновременным нормированием объёма вовлечённого воздуха в смеси, ограничением водоцементного отношения, предъявлением особых требований к цементу и заполнителям и др. В результате проведенных широкомасштабных исследований был сделан однозначный вывод, что бетон без воздухововлекающих или газообразующих добавок, при прочих равных условиях, недостаточно морозостоек независимо от удобоукладываемости бетонной смеси, величины В/Ц или прочности бетона. При этом общепризнано, что роль воздухововлекающих или газообразующих добавок в обеспечении морозостойкости бетона заключается в создании в бетоне резервных воздушных или наполненных газом равномерно распределённых пор размером менее 250-300 мкм.

Указанные требования отражены в ряде нормативно-технических документов и в многочисленных публикациях (ГОСТ 6665-91 Камни бетонные и железобетонные бортовые; ГОСТ 25912.0-91 Плиты железобетонные для аэродромных покрытий; ГОСТ 21924-76 Плиты железобетонные покрытий городских дорог; ГОСТ 19231.0-83 Плиты железобетонные для покрытий трамвайных путей; ГОСТ 17608-91 Плиты бетонные тротуарные; Инструкция по изготовлению гидротехнических конструкций из бетона марки Мрз1000 (ВР-1-75); Рекомендации по повышению долговечности бетонных и железобетонных фундаментов зданий и сооружений в условиях отрицательных температур, вечномерзлых грунтов и агрессивных сред. - М.: НИИЖБ, 1983; Указания по обеспечению долговечности бетонных и железобетонных конструкций морских гидротехнических сооружений ВСН 6-69; Указания по повышению морозостойкости бетона транспортных сооружений ВСН 150-93; Технические указания по применению мелкозернистых (песчаных) цементных бетонов в дорожном строительстве ВСН 171-70; Рекомендации по составам высокопрочного бетона и технологии изготовления мостовых конструкций. - Минск, НПО "Белавтодорпрогресс", 1999.).

Характеристика дорожного бетона	ГОСТ 26633-92		EN 206-1
	до Изменения №2	с Изменением №2	
Водоцементное отношение, В/Ц, не выше	0,50 независимо от удобоукладываемости смеси	В зависимости от удобоукладываемости смеси. Для подвижной смеси – 0,45 Для жёсткой смеси – 0,35	0,45 независимо от удобоукладываемости смеси
Объём вовлечённого воздуха, $V_B$ , %, в смеси для тяжёлого бетона мелкозернистого бетона	независимо от удобоукладываемости смеси 5-7 2-7	Для всех видов дорожного бетона в зависимости от удобоукладываемости смеси. Для подвижной смеси – не менее 5 Для жёсткой смеси – не нормируется	$8 \geq V_B \geq 4$ Независимо от удобоукладываемости смеси и вида бетона
Объём условно закрытых пор бетона, $P_{уз}$ , %	Не нормируется	В зависимости от удобоукладываемости смеси. Для подвижной смеси – не менее 3,5 Для жёсткой смеси – не нормируется	Не нормируется
Наличие химических добавок, повышающих морозостойкость дорожного бетона (воздухововлекающих или газообразующих)	Обязательно для дорожного бетона марки по морозостойкости F100 и выше. Независимо от удобоукладываемости смеси и вида бетона.	Как правило, с обязательным применением воздухововлекающих и пластифицирующих добавок. При соответствующем техническом обосновании допускается готовить жёсткие смеси с одной пластифицирующей добавкой, а подвижные смеси с одной воздухововлекающей. Газообразующие добавки вместо воздухововлекающей допускается применять только после специальных исследований и опытного строительства.	Применение химических добавок по EN 934-2

Изменение №2 ГОСТ 26633-91 допускает не применять воздухововлекающие или газообразующие добавки в жёсткие бетонные смеси для дорожного бетона, не нормировать в них объём вовлечённого воздуха или газа (см. табл. 1). Это принципиальное отличие Изменения №2 от требований к дорожному бетону, к бетонам высокой морозостойкости, установленным ранее. Такое ослабление требований к составу дорожного бетона, которое противоречит изложенным выше принципам получения бетонов высокой морозостойкости, результатам научных исследований и практике строительства, в том числе требованиям европейского стандарта EN 206-1, закономерно приведёт к снижению морозостойкости дорожного бетона из жёсткой бетонной смеси и долговечности построенных с его использованием покрытий.

Следует отметить, что ГОСТ 26633-91, действовавший до принятия Изменения №2, не препятствовал применению в покрытиях или дорожных изделиях бетона из жёсткой бетонной смеси. В частности, ничто не мешало устраивать покрытия из жёсткой смеси методом укатки или изготавливать бетонный бортовой камень или тротуарную плитку методом виброформования (вибропрессования). В этом случае взамен воздухововлекающих добавок, которые малоэффективны в жёстких бетонных смесях (марок Ж3 и Ж4 по классификации ГОСТ 7473-94), предлагалось использовать газообразующие добавки, широкие исследования которых проводились в 60-80-е годы прошлого века в НИИЖБ, СоюздорНИИ, и в других организациях. Применение газообразующих добавок предусматривал также ранее действовавший ГОСТ 8424-72 Бетон дорожный. Неясно, почему теперь, согласно Изменению №2, они практически запрещены к использованию в дорожном бетоне.

Изменение №2 распространяется на все жёсткие бетонные смеси. Теперь для всех марок жёсткой бетонной смеси по удобоукладываемости (от марки Ж1 по марку Ж4) объём вовлечённого воздуха не нормируется. В то же время в технологии бетонов хорошо известно, что бетонные смеси марки П1 и Ж1 (зачастую, Ж2) весьма близки и трудно разделимы по своим технологическим характеристикам. Т.е., несмотря на различие в формальной классификации по удобоукладываемости, существует переходная область бетонных смесей, в которую попадают малоподвижные (марки П1) и умеренно жёсткие (марки Ж1 и Ж2) смеси, очень близкие или совпадающие по своей фактической удобоукладываемости (формуемости). Следовательно, на практике при использовании для устройства монолитных и сборных покрытий жёсткой бетонной смеси марки Ж1 также следует применять воздухововлекающие или газообразующие добавки и нормировать объём вовлечённого в бетонную смесь воздуха.

Это положение подтверждается как ранее действовавшими требованиями ГОСТ 26633-91, независимыми от удобоукладываемости смеси (см. табл. 1), так и существующими нормами СНиП 3.06.06-88, СНиП 3.06.03-85 (табл. 2), регламентирующими использование малоподвижных бетонных смесей марки П1 и умеренно жёстких бетонных смесей марки Ж1 (Ж2). Кроме того, в настоящее время такие смеси (с осадкой конуса 1-2 см, марки П1 и жёсткостью до 10-15 сек, марок Ж1 и Ж2) применяют для заводского изготовления аэродромных и дорожных конструкций (например, плит). Во всех этих бетонных смесях для обеспечения морозостойкости также в обязательном порядке нормируется объём вовлечённого воздуха в количестве 5-6%.

Способ укладки бетонной смеси	Удобоукладываемость по ГОСТ 10181	
	Подвижность, см, не более (марка по ГОСТ 7473)	Жёсткость, сек, не менее (марка по ГОСТ 7473)
в рельс-формах	2 (П1)	8 (Ж1)
со скользящей опалубкой, при скорости, м/мин:		
2 и менее	2 (П1)	8 (Ж1)
от 2 до 2,5	3 (П1)	5 (Ж1)
от 2,5 до 3,0	4 (П1)	3 (П1)

В Изменении №2 отменено ранее существовавшее нормирование (ограничение) верхнего предела содержания вовлечённого воздуха в бетонной смеси для дорожного бетона (см. табл. 1). Это означает, что минимальный объём вовлечённого в бетонную смесь воздуха должен быть, как и раньше, не менее 5%, но может быть неограниченно большим, и это не будет нарушением стандарта. Неоправданно высокое содержание вовлечённого воздуха в бетонной смеси (более 8%), по известным литературным данным, может способствовать образованию крупных воздушных пузырьков в бетоне (более 300 мкм), созданию крупнопористой, близкой к ячеистой, поровой структуры бетона. Это приведёт к существенному снижению однородности, прочности и морозостойкости бетона.

Европейский стандарт EN 206-1 также нормирует для бетонов с аналогичными дорожному бетону эксплуатационными средами и минимальный объём вовлечённого воздуха в бетонной смеси (4%), и верхнее его содержание (8%). Отсутствие верхнего предела содержания вовлечённого в бетонную смесь воздуха противоречит требованиям упоминавшихся выше ГОСТ 25912.0-91, ГОСТ 6665-91, ГОСТ 17608-91 на сборные изделия и других нормативно-технических документов.

Изменение №2 вводит новый показатель качества дорожного бетона из подвижных бетонных смесей, по-видимому, направленный на обеспечение его морозостойкости. Это – минимальный объём условно закрытых пор ( $P_{y3} \geq 3,5\%$ ). Введение нового критерия означает, что действовавшая ранее система нормативных требований к бетонной смеси и бетону была недостаточной для обеспечения морозостойкости дорожного бетона, но с этим нельзя согласиться. Исследования и практика строительства цементобетонных покрытий подтверждают, что если соблюдены требования к составу бетона, если на месте бетонирования смесь по удобоукладываемости соответствует требованиям принятой технологии работ, а величина  $V_b$  – требованиям ГОСТ 26633-91 (до Изменения №2), прочность, морозостойкость и в целом долговечность бетона будут обеспечены. Введение нового дополнительного нормативного критерия качества дорожного бетона никак не обосновано.

При этом нормирование  $P_{y3}$  может привести к выбраковке бетона при величине  $P_{y3} \leq 3,5\%$ , хотя бетон будет прочным и морозостойким. Данный критерий ( $P_{y3}$ ) не проверен практикой строительства цементобетонных покрытий. Не изучена однородность бетона по этому показателю. Строительные лаборатории не готовы к контролю и приёмке бетона по величине его условно закрытой пористости.

Следует также отметить, что показатели пористости бетона определяют в возрасте 28 сут, как и проектные показатели его прочности или морозостойкости. Соответственно, в отличие от характеристик бетонной смеси (удобоукладываемости или объёма вовлечённого воздуха), показатели пористости не позволяют оперативно регулировать свойства бетонной смеси и бетона. В то же время принято считать, что величина открытой капиллярной пористости,  $P_o$ , в бетоне связана со значением  $V/C$ , а  $P_{y3}$  – с объёмом воздушных пор в затвердевшем бетоне. Это позволяет факультативно, на качественном уровне, использовать данные величины в анализе свойств дорожного бетона.

Как показали ранее выполненные в СоюздорНИИ исследования, морозостойкий дорожный бетон (бетон с воздухововлекающими добавками, нормируемым объёмом вовлечённого воздуха в бетонной смеси, ограниченным значением  $V/C$  и др.) обычно характеризуется величиной  $P_{y3}$  в пределах 3-7%.

При этом одновременно величина полной пористости бетона,  $P_n$ , составляет 15-20%, а  $P_o$  – 10-15%.

Эти рамочные показатели пористости бетона позволяют предварительно оценить возможное поведение дорожного бетона при его испытании на морозостойкость (или в процессе эксплуатации покрытий), но не могут заменить результаты прямых испытаний бетона на прочность или на морозостойкость, не могут служить количественным браковочным критерием морозостойкости бетона.

Здесь важно также обратить внимание на методике определения величины условно закрытой пористости бетона. Величина  $P_{y3}$  определяется разностью между величинами  $P_n$  и  $P_o$ . При этом первую рассчитывают по величине плотности бетона без пор, а вторую определяют водонасыщением высушенных образцов (ГОСТ 12730-78). Иными словами, на величину  $P_{y3}$  влияют насыщаемые водой поры и капилляры, определяющие значение  $P_o$ . Однако при водонасыщении часть крупных воздушных пор, образованных вовлечённым воздухом, также может заполняться водой, увеличивая объём  $P_o$  и соответственно уменьшая величину  $P_{y3}$ . Одновременно часть капилляров (например, тонких) может не заполняться водой при стандартном способе водонасыщения, но дополнительно поглощать воду при вакуумировании или кипячении образцов. Иначе говоря, величина  $P_{y3}$  в бетоне зависит не только от со-

держания воздушных пор, но и от объёма капиллярных пор, метода его определения и не может служить однозначной мерой именно воздушных пор, полезных для обеспечения морозостойкости бетона, не может самостоятельно определять, является бетон морозостойким или нет.

За рубежом, как известно, объём, а также размер и распределение воздушных пор по размерам определяют в затвердевшем бетоне только микроскопически, по шлифам бетона. При этом по полученным данным рассчитывают не только общий объём воздушных пор, но также другую важную для прогноза морозостойкости бетона характеристику его поровой структуры – величину "фактора расстояния". В Изменении №2 требования к  $V_v$  бетонной смеси для тяжёлого бетона и к величине  $P_{уз}$  распространены также на мелкозернистые (песчаные) бетоны, что не учитывает известные особенности структуры и свойств дорожных мелкозернистых бетонов, исследованных в СоюздорНИИ ранее и отражённых в ГОСТ 26633-91 до принятия Изменения №2. Последнее требует, как правило, готовить все бетонные смеси для дорожного бетона с применением воздухововлекающих и пластифицирующих добавок. Однако при этом для жёстких смесей отсутствует критерий назначения количества воздухововлекающих добавок (в виде нормируемого объёма вовлечённого воздуха в смеси), что делает бессмысленным их использование. Одновременно Изменение №2 допускает возможность приготовления жёстких бетонных смесей для дорожного бетона без воздухововлекающих добавок (см. табл. 1) после соответствующего технического обоснования. При этом в стандарте не определено, как проводить такие обоснования. Это практически позволяет вместо исследований ограничиваться определением только проектной марки бетона на прочность и морозостойкость, что совершенно недостаточно для оценки долговечности дорожного бетона (срока службы покрытия).

Важно отметить, что назначение марки бетона по морозостойкости в известной степени носит формальный характер. По нашему мнению, сравнивать морозостойкость бетонов с принципиально различными структурами и делать выводы о пригодности тех или иных составов бетона (или технологий) возможно только путём изучения (сопоставления) кинетики изменения прочности, массы и внешнего вида, состояния образцов бетона при их испытании на морозостойкость. При этом, чтобы получить для сравнения кинетические зависимости свойств бетона от числа циклов замораживания-оттаивания, такие испытания необходимо проводить на базе существенно большего (в 3-4 раза) числа циклов, чем проектная марка бетона, при доведении образцов до разрушения (например, до величины критериев морозостой-

кости по ГОСТ 10060-95). В частности, по нашим данным, признаки морозного разрушения для современного дорожного бетона в виде снижения прочности, шелушения, появления трещин или отколов проявляются не ранее, чем после стандартных 400-500 циклов замораживания-оттаивания (по второму базовому методу ГОСТ 10060.0-95, при испытании в 5%-ном водном растворе хлорида натрия). Только такие сравнительные испытания позволят сделать объективный вывод о пригодности тех или иных новых технических решений, затрагивающих морозостойкость бетона.

### Общий вывод

1. Принятые в Изменении №2 принципиально иные требования к дорожному бетону, в том числе из жёстких бетонных смесей, не учитывают в полной мере результаты научных исследований и практики строительства, в том числе требования европейского стандарта EN 206-1, и могут привести к снижению качества и долговечности цементобетонных покрытий.

2. При очередном пересмотре ГОСТ 26633-91 предлагается учесть следующие положения, касающиеся дорожных бетонов:

2.1. Не подразделять требования к водоцементному отношению (В/Ц) в зависимости от удобоукладываемости бетонной смеси, установив общее ограничение для бетона покрытий автомобильных дорог и аэродромов: В/Ц должно быть не более 0,45.

2.2. Отказаться от нормирования только минимального объёма вовлечённого воздуха в бетонной смеси для дорожного бетона. Для дорожных и аэродромных покрытий объём вовлечённого воздуха в бетонной смеси должен соответствовать значениям, приведенным в табл. 3.

Таблица 3

Вид бетона	Объём вовлечённого воздуха в бетонной смеси, %
Тяжёлый	не менее 5, не более 7
Мелкозернистый	не менее 2, не более 7

Содержание условно закрытых пор в дорожном бетоне не нормировать.

2.3. Использование химических добавок для обеспечения морозостойкости дорожного бетона не связывать с удобоукладываемостью бетонной смеси. Бетоны для дорожных и аэродромных покрытий следует готовить с обязательным применением воздухововлекающей или газообразующей добавок, как правило, в комплексе с пластифицирующими добавками.

**Шилин А.А. Кирпичные и каменные конструкции. Повреждения и ремонт:** Учебное пособие для ВУЗов. - М.: издательство "Горная книга", издательство Московского государственного горного университета, 2009. - 214с.: ил. (Стройтехиздат)

В книге изложены важнейшие принципы и методы диагностики и оценки состояния каменных и кирпичных строительных конструкций. Дан серьезный анализ особенностей эксплуатации каменных и кирпичных зданий и сооружений.

Рассмотрены современные технологии и материалы для ремонта, реставрации, а также защиты от воздействий окружающей среды и несоблюдения правильного эксплуатационного режима.

Описаны и систематизированы различные типы и виды повреждений и дефектов конструкций. Проанализированы причины, их вызывающие.

В книге обобщены результаты многолетнего изучения отечественного и зарубежного опыта ремонта и реставрации кирпичных и каменных конструкций, включая более чем двадцатилетний опыт автора, полученный им при выполнении подобных работ на объектах различного назначения.

В книге собран богатейший иллюстративный материал – технологические схемы, рисунки, чертежи, а также большое количество фотографий из разных городов и стран.

**Методы контроля качества материалов и строительных конструкций. Лабораторный практикум / Шилин А.А., Кириленко А.М., Загоршменный А.И. и др. /** Под ред. проф., д.т.н. Шилина А.А. - М.: издательство "Горная книга", издательство Московского государственного горного университета, 2009. - 214с.: ил. (Стройтехиздат)

В лабораторном практикуме описаны методы, основанные на многолетнем опыте практических и научно-исследовательских работ по контролю качества строительных конструкций и материалов с учетом самых современных разработок, используемых в мировой и отечественной практике.

Рассмотрены схемы применения методов неразрушающего и разрушающего контроля для оценки состояния строительных конструкций. Приведены примеры наиболее типичных видов дефектов и повреждений конструкций и сооружений.

Описаны виды и типы самых современных приборов, используемых для определения и оценки самых различных параметров и характеристик конструкций и материалов.

Даны практические, а также научно-теоретические рекомендации для специалистов, занимающихся вопросами диагностики и оценки состояния строительных конструкций.

Книга рекомендована также как учебное пособие для студентов и аспирантов соответствующих ВУЗов и специальностей.

Книга оснащена богатым справочно-иллюстративным материалом.

**Шилин А.А. Ремонт строительных конструкций с помощью инъецирования:** Учебное пособие для ВУЗов. - М.: издательство "Горная книга", издательство Московского государственного горного университета, 2009. - 170с.: ил. (Стройтехиздат)

В книге рассматриваются практически все аспекты использования современных инъекционных технологий при строительстве, ремонте, реставрации и усилении конструкций и сооружений различного назначения, а также при укреплении грунтовых и породных массивов.

Описаны технологии герметизации трещин и пористых участков в кирпичных, каменных и железобетонных конструкциях; упрочнения кирпичных, каменных и трещиноватых бетонных конструкций больших размеров; заполнения пустот в конструкциях и за ними.

Приведены варианты технических приемов и проектных решений, а также принципы расчета параметров инъецирования.

Описано большое число практических примеров применения новейших материалов для инъецирования, приведены технические характеристики.

Рассмотрены способы нагнетания, виды используемого оборудования.

Значительное внимание уделено такому важному фактору, как контроль производства инъекционных работ.

Книга написана на основе изучения зарубежного и отечественного опыта, а также многолетних научных и практических работ автора в этой области.

Книга оснащена богатым справочно-иллюстративным материалом.

***По вопросу приобретения книг обращаться в ЗАО "Триада-Холдинг"***

123308 г. Москва, пр-т Маршала Жукова, д.6, стр.2

Тел.: (495) 956-15-04; 956-18-52; 234-16-10

E-mail: [info@triadaholding.ru](mailto:info@triadaholding.ru)

Редакционная коллегия: Ю.М. Баженов, В.М. Бондаренко, Ю.С. Волков, В.В. Гранев, А.И. Звездов, Ю.П. Назаров, В.А. Рахманов, В.В. Ремнев (главный редактор), А.С. Семченков, А.Г. Тамразян, В.Р. Фаликман, Ю.Г. Хаютин, А.А. Шлыков (зам. главного редактора)

Подписано в печать 28.11.10. Формат 60x88 1/8. Печать офсетная. Бумага офсетная № 1

Усл.печ.л. 4,0. Тираж 960 экз. Заказ №

Адрес для писем:

111672, Москва, ул. Новокосинская, д. 14, корп. 2, кв. 172

E-mail: [magbeton@rambler.ru](mailto:magbeton@rambler.ru)

<http://www.cstroy.ru/kindwork/izdat/beton>

Тел. (495) 703-9762

Отпечатано в ОАО Московская типография № 9  
109033, Москва, Волочаевская ул., д. 40