

УДК 622.831

**Балек Александр Евгеньевич**

доктор технических наук,  
ведущий научный сотрудник,  
лаборатория геомеханики подземных  
сооружений,  
Институт горного дела УрО РАН,  
620075, г. Екатеринбург,  
Мамина-Сибиряка 58  
e-mail: [balek@igduran.ru](mailto:balek@igduran.ru)

**Харисов Тимур Фаритович**

кандидат технических наук,  
заведующий лабораторией геомеханики  
подземных сооружений,  
Институт горного дела УрО РАН  
e-mail: [timur-ne@mail.ru](mailto:timur-ne@mail.ru)

**Масальский Николай Александрович**

лаборант,  
лаборатория геомеханики подземных  
сооружений,  
Институт горного дела УрО РАН,  
e-mail: [nmasalskiy01@mail.ru](mailto:nmasalskiy01@mail.ru)

**Коптяков Дмитрий Александрович**

научный сотрудник,  
лаборатория геомеханики  
подземных сооружений,  
Институт горного дела УрО РАН  
e-mail: [koptyakov\\_d@mail.ru](mailto:koptyakov_d@mail.ru)

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПА НАБОРА ПРОЧНОСТНЫХ И ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ БЕТОНА В ШАХТНЫХ И ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ\*

*Аннотация:*

*В работе представлены результаты натурных и лабораторных исследований. Целью исследований являлось выявление относительной неравномерности набора твердеющим бетоном прочностных и деформационных свойств. Обнаружились новые, не учитываемые действующими нормативными документами факторы формирования напряжений в монолитных шахтных креплениях из тяжелых бетонов на портландцементе. Было экспериментально установлено, что на ранних стадиях твердения (в течение 1 – 1,5 месяцев) бетон набирает упругие свойства относительно более медленными темпами, чем прочностные.*

*Ключевые слова:* монолитная крепь, бетон, испытания, прочность, упругость, несущая способность, кинетика твердения, прогнозирование.

DOI: 10.25635/2313-1586.2024.04.064

**Balek Alexander Ye.**

Doctor of Engineering Sciences,  
Leading Researcher,  
Laboratory of geomechanics  
of underground structures,  
Institute of Mining UB RAS,  
620075 Ekaterinburg,  
58 Mamina-Sibiryaka Str.  
e-mail: [balek@igduran.ru](mailto:balek@igduran.ru)

**Kharisov Timur F.**

Candidate of Technical Sciences,  
Head of Laboratory of geomechanics  
of underground structures,  
Institute of Mining UB RAS  
e-mail: [timur-ne@mail.ru](mailto:timur-ne@mail.ru)

**Masalsky Nikolay A.**

Laboratory Assistant,  
Laboratory of geomechanics  
of underground structures,  
Institute of Mining UB RAS  
e-mail: [nmasalskiy01@mail.ru](mailto:nmasalskiy01@mail.ru)

**Koptyakov Dmitry A.**

Researcher,  
Laboratory of geomechanics  
of underground structures,  
Institute of Mining UB RAS  
e-mail: [koptyakov\\_d@mail.ru](mailto:koptyakov_d@mail.ru)

#### STUDY OF THE RATE OF CONCRETE STRENGTH AND DEFORMATION PROPERTIES SET IN MINE AND LABORATORY CONDITIONS

*Abstract:*

*The paper presents the results of field and laboratory studies. The purpose of the research was to identify the relative unevenness of the set of hardening concrete strength and deformation properties. New factors of stress formation in monolithic shaft supports made of heavy concrete on Portland cements, which are not taken into account by current regulatory documents, have been discovered. It has been experimentally established that in the early stages of hardening (within 1 – 1.5 months), concrete gains elastic properties at a relatively slower rate than strength properties.*

*Key words:* monolithic concrete support, concrete, trials, strength elasticity, bearing capacity, kinetics of hardening, forecasting.

\* Статья подготовлена в рамках реализации государственного задания № 075-00412-22 ПР, тема 3 рег. № 1021062010536-3-1.5.1

### Введение

Параметром, практически не учитываемым в геомеханических расчетах, но существенно влияющим на напряженно-деформированное состояние монолитной бетонной крепи подземных выработок (в особенности вертикальных стволов), является относительная неравномерность набора твердеющим бетоном прочностных и деформационных свойств. Имеется в виду весь тот комплекс сложных процессов, который в материаловедении именуется кинетикой твердения бетона. Строительными механиками решению этого вопроса не уделяется должного внимания, поскольку для наземных сооружений главным является набор бетоном прочности [1 – 2].

Однако при уходке забоя шахтного ствола от темпов набора бетоном упругих свойств, определяемых модулями упругости, существенно зависят напряжения, формирующиеся в крепи. Геомеханикам важно знать, на какой стадии проходки ствола упругую конвергенцию его породных стенок будет воспринимать бетон, уже набравший жесткость, а в каких условиях бетон монолитной крепи будет деформироваться без нарушения сплошности в пластическом режиме и, таким образом, уходить от нагрузок.

Для решения этой задачи ИГД УрО РАН был проведен комплекс натуральных и лабораторных исследований.

### Методы исследований

Испытания прочностных и деформационных свойств типичной монолитной шахтной крепи из тяжелых бетонов на портландцементе проводились по кубиковым образцам разновозрастного бетона, выпиленным из различных участков монолитной крепи строящегося вертикального ствола. Кубиковая прочность  $R$  и начальный модуль упругости  $E$  бетона крепи определялись стандартным методом разрушающего контроля в лабораторных условиях.

Для оценки темпов изменения прочностных и деформационных свойств бетонной крепи во времени в нормальных температурно-влажностных условиях выполнены лабораторные исследования кинетики твердения бетона класса  $B 25$ : типового тяжелого бетона, применяющегося для крепи вертикальных стволов. На специально изготовленных образцах – призмах стандартных размеров (с отношением высоты к ширине, равным 4) различного возраста стандартным методом разрушающего контроля проведен комплекс прессометрических лабораторных испытаний контрольных партий образцов на призмную прочность  $R_{пр}$  и на начальный модуль упругости  $E$  бетона.

Все работы выполнялись в соответствии с требованиями ГОСТ 28570-2019 «Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобранным из конструкций» [3] и ГОСТ 24452-2023 «Бетоны. Методы определения призмной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона» [4]. Размеры образцов по крупности заполнителя, оборудование для их изготовления и правила выдерживания, прессовое и испытательное оборудование, инструменты и приборы, а также интервал рабочих температур в помещении, где проводились исследования, соответствовали требованиям ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам» [5].

Для измерения деформаций применялись индикаторы часового типа по ГОСТ 9696-82 «Индикаторы многооборотные с ценой деления 0,001 и 0,002 мм. Технические условия», обеспечивающие измерение относительных линейных деформаций с точностью 0,001 мм [6]. Индикаторы крепились на образцах с помощью прижимных приспособлений на фиксируемой базе, которая отстояла на одинаковом расстоянии от торцов образца и не превышала  $2/3$  его высоты, но более чем в 2,5 раза превышала наибольший размер зерен заполнителя бетона.

Кубиковая прочность бетона на одноосное сжатие определялась по формуле

$$R = \alpha P / S, \quad (1)$$

расчетная призмная прочность – по формуле

$$R_{\text{пр}} = 0,75 R, \quad (2)$$

начальный модуль упругости – по формуле

$$E = \Delta\sigma / \Delta\varepsilon, \quad (3)$$

где  $R$  и  $R_{\text{пр}}$  – прочность бетона на одноосное сжатие, соответственно, кубиковая и призмная, МПа;

$\alpha$  – безразмерный масштабный коэффициент, принимаемый 0,85 при высоте образцов-кубиков  $5 \div 6$  см, 0,95 – при их высоте  $9 \div 10$  см и 1 – при высоте более 10 см;

$P$  – разрушающая нагрузка, считываемая по шкале силоизмерителя прессы, кН;

$S$  – площадь поперечного сечения образца, определяемая по его линейным размерам, см<sup>2</sup>;

$E$  – начальный модуль упругости бетона, ГПа;

$\Delta\sigma = \Delta P / S$  – приращение главных нормальных напряжений, действующих в образце от условного нуля до уровня внешней нагрузки, не превышающей 30 % от разрушающей нагрузки  $P$ , МПа;

$\Delta P$  – приращение внешней нагрузки, соответствующее приращению  $\Delta\sigma$ , кН;

$\Delta\varepsilon$  – приращение упруго-мгновенной продольной относительной деформации образца, соответствующее уровню внешней нагрузки, не превышающей 30 % от разрушающей, замеренной в начале и в конце каждой ступени ее приложения.

При определении модуля упругости нагружение каждого образца до уровня нагрузки ( $40 \pm 5$  %)  $P$  проводилось ступенями, составляющими не более 10 % от ожидаемой разрушающей нагрузки  $P$ , с выдерживанием в пределах каждой ступени скорости нагружения около ( $0,6 \pm 0,2$ ) МПа/с. На каждой ступени нагрузка выдерживалась от 4 до 5 мин с записью отсчетов по приборам в начале и в конце выдержки. При уровне нагрузки ( $40 \pm 5$  %)  $P$  приборы с образца снимались, и дальнейшее нагружение образца до его полного разрушения выполнялось непрерывно с постоянной скоростью около ( $0,6 \pm 0,4$ ) МПа/с.

В пределах каждой ступени нагружения приращения упруго-мгновенной относительной продольной деформации образца определялись путем линейной интерполяции: как среднее арифметическое показаний приборов по граням образца, а значения относительных деформаций рассчитывались по формуле

$$\varepsilon = \Delta l_1 / l_1, \quad (4)$$

где  $\Delta l_1$  – замеренные абсолютные приращения продольной деформации образца, вызванные соответствующим приращением напряжений;

$l_1$  – фиксированная база измерения продольной деформации образца.

В каждой серии образцов средние значения кубиковой или призмной прочности, равно как и модуля упругости бетона, определяли по формуле

$$y_{\text{ср}} = 1/n \sum y_i, \quad (5)$$

где  $y_{\text{ср}}$  – среднее значение указанных величин в серии образцов;

$y_i$  – значение указанных величин по отдельным образцам;

$n$  – число образцов в серии.

Начальное усилие обжатия (которое при испытании принималось за условный ноль) по всем образцам не превышало 2 % от разрушающей нагрузки  $P$ , составляющей менее 80 % от максимального значения шкалы силоизмерителя прессы. В процессе проведения испытания от условного нуля до нагрузки ( $40 \pm 5$  %)  $P$  отклонения деформаций по каждой грани образца не превышали 15 % от их среднего арифметического значения.

При испытаниях призматических бетонных образцов-призм с отношением высоты к ширине, равным 4, призмная прочность бетона напрямую определялась по результатам замеров по формуле (1).

Для оперативной оценки прочности и сопоставительного анализа разновозрастных участков бетонной крепи в шахтном стволе применялись ручные склерометры ти-

па ИПС-МГ 4, использующие метод упругого отскока бойка от прижатого к поверхности бетона ударника, в соответствии с ГОСТ 22690-2015 «Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля» [7].

### Результаты исследований

Испытания прочностных и деформационных свойств монолитной бетонной крепи шахтного ствола проводились по образцам бетона, выпиленным на строящемся стволе «Вентиляционный» 2-й очереди шахты «10-летие независимости Казахстана» (шахта «ДНК») Донского ГОКа из крепи 30- и 90-суточного возраста. Размеры щебня во всех образцах не превышали 10 – 12 мм, что позволяло при испытаниях использовать кубиковые образцы минимально допустимых размеров: от 50 – 60 до 90 – 100 мм.

В общей сложности испытано 14 бетонных образцов, 6 из которых были также использованы для определения начального модуля упругости бетона. Результаты пресометрических испытаний представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

### Результаты испытаний прочностных свойств разновозрастных образцов бетонной крепи ствола «Вентиляционный» шахты «ДНК»

№ образца (возраст бетона, сут)	Размеры образца, см	Площадь рабочего сечения образца $S$ , см <sup>2</sup>	Разрушающая нагрузка $P$ , кН	Масштабный коэффициент $\alpha$	Замеренная кубиковая прочность $R$ , МПа	Расчетная призмная прочность $R_{пр}$ , МПа
1 (30)	4,1×4,1×4,7	17,2	770	0,85	38,1	28,5
2 (30)	4,1×4,1×5,0	16,7	635	0,85	32,3	24,2
3 (30)	4,3×4,3×4,8	18,6	708	0,85	32,4	24,3
4 (30)	4,2×4,2×4,8	17,6	605	0,85	29,2	21,9
5 (30)	4,5×4,5×4,8	20,1	916	0,85	38,8	29,1
6 (30)	4,3×4,3×5,3	18,1	677	0,85	31,8	23,9
7 (30)	4,5×4,5×5,7	20,3	628	0,85	26,3	19,7
8 (30)	4,8×4,8×6,0	23,0	549	0,85	20,3	15,2
<b>Среднее арифметическое для 30-суточного возраста:</b>					<b>31,2 ± 5,0</b>	<b>23,4 ± 3,8</b>
<b>Коэффициент вариации для 30-суточного возраста:</b>					<b>19,3 %</b>	<b>19,3 %</b>
9 (90)	9,5×9,4×9,5	89,5	3863	0,95	41,0	30,8
10 (90)	9,8×9,8×10,0	96,0	3618	0,95	35,8	26,9
11 (90)	4,2×4,2×5,0	17,4	661	0,85	32,3	24,2
12 (90)	4,0×4,1×5,7	16,3	704	0,85	36,7	27,5
13 (90)	4,2×4,2×5,2	17,4	818	0,85	40,0	30,0
14 (90)	4,2×4,2×4,9	17,4	716	0,85	35,0	26,2
<b>Среднее арифметическое для 90-суточного возраста:</b>					<b>36,8 ± 3,4</b>	<b>27,6 ± 2,6</b>
<b>Коэффициент вариации для 90-суточного возраста:</b>					<b>8,9 %</b>	<b>8,9 %</b>

Таблица 2

**Результаты испытаний деформационных свойств разновозрастных образцов бетонной крепи ствола «Вентиляционный» шахты «ДНК»**

№ образца (возраст бетона, сут)	Размеры образца, см	Площадь рабочего сечения образца $S$ , см <sup>2</sup>	Разрушающая нагрузка $P$ , кН	Приращение напряжений при нагрузке $0,3P$ , МПа	Приращение деформации при нагрузке $0,3P$ , мм/м	Начальный модуль упругости $E$ , ГПа
6 (30)	4,3×4,3×5,3	18,1	677	8,1	0,55	14,7
7 (30)	4,5×4,5×5,7	20,3	628	7,9	0,57	13,9
8 (30)	4,8×4,8×6,0	23,0	549	6,1	0,49	12,4
<b>Среднее арифметическое для 30-суточного возраста:</b>						<b>13,2 ± 2,9</b>
<b>Коэффициент вариации для 30-суточного возраста:</b>						<b>8,5 %</b>
12 (90)	4,0×4,1×5,7	16,3	704	9,1	0,48	19,0
13 (90)	4,2×4,2×5,2	17,4	818	7,6	0,30	25,3
14 (90)	4,2×4,2×4,9	17,4	716	8,0	0,38	21,0
<b>Среднее арифметическое для 90-суточного возраста:</b>						<b>21,8 ± 8,0</b>
<b>Коэффициент вариации для 90-суточного возраста:</b>						<b>14,8 %</b>

Выполненная в местах выпиливания образцов в стволе «Вентиляционный» оперативная оценка прочности бетонной крепи с помощью ручного склерометра ИПС-МГ 4, использующего метод упругого отскока бойка от прижатого к поверхности бетона ударника, показала следующие средние (с коэффициентом вариации 25 – 35 %) значения кубиковой прочности бетона: в возрасте 30 сут – 10 МПа; в возрасте 90 сут – 16 МПа; в возрасте свыше 180 сут – 25 ÷ 31 МПа.

Для выявления различий в темпах набора монолитной крепью прочностных и деформационных свойств был проведен комплекс прессометрических лабораторных испытаний бетона на призменную прочность  $R_{пр}$  и на начальный модуль упругости  $E$  для серий контрольных образцов различного возраста (2, 7, 14, 35 и 101 сут), изготовленных и выдерживаемых при комнатных температуре и влажности. Исследования выполнялись на призматических бетонных образцах минимально допустимых размеров: 7 см × 7 см × 28 см с постоянными площадью рабочего сечения  $S = 49$  см<sup>2</sup> и базой измерения деформаций 10 см, располагавшейся на одинаковом фиксируемом расстоянии от торцов призм.

При изготовлении образцов использовали портландцемент марки М400, гранитный заполнитель с максимальной крупностью зерен 20 мм и кварцевый песок. Все материалы взяты из партий, применявшихся при изготовлении бетона класса В 25 для крепи ствола «Вентиляционный» в соответствии с ГОСТ 26633-2015 «Межгосударственный стандарт. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия», а именно: цемент – песок – щебень в соотношении 1 – 2 – 3 при водоцементном соотношении В / Ц в пределах 0,4 ÷ 0,5 [8]. Данный состав бетонной смеси является стандартным для тяжелых бетонов класса В 25, наиболее широко использующихся для крепления шахтных стволов.

Результаты прессометрических испытаний разновозрастных призматических бетонных образцов представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты испытаний бетона, используемого для крепи ствола «Вентиляционный» шахты «ДНК», на призменную прочность  $R_{пр}$  и на начальный модуль упругости  $E$  при различном возрасте бетонных образцов-призм

№ образца (возраст бетона, сут)	Разрушающая нагрузка $P$ , кН	Приращение напряжений при нагрузке $0,3P$ , МПа	Приращение деформации при нагрузке $0,3P$ , мм/м	Замеренная призменная прочность $R_{пр}$ , МПа	Начальный модуль упругости $E$ , ГПа	Отношение $R_{пр} / E$ , МПа/ГПа
1 (2)	270	1,6	0,17	5,5	9,6	0,57
2 (2)	274	1,4	0,17	5,6	8,5	0,66
3 (2)	274	1,3	0,15	5,6	8,9	0,63
4 (2)	299	1,5	0,18	6,1	8,6	0,71
<b>Среднее арифметическое для 2-суточного возраста:</b>				<b>5,7 ± 0,4</b>	<b>8,9 ± 0,8</b>	<b>0,64 ± 0,1</b>
<b>Коэффициент вариации для 2-суточного возраста:</b>				<b>4,8 %</b>	<b>5,6 %</b>	<b>8,9 %</b>
5 (7)	500	3,3	0,25	10,2	13,3	0,77
6 (7)	564	4,6	0,30	11,5	15,3	0,75
7 (7)	598	3,9	0,25	12,2	15,6	0,78
8 (7)	524	4,0	0,28	10,7	14,2	0,75
9 (7)	735	4,7	0,32	15,0	14,8	1,01
10 (7)	461	2,6	0,25	9,4	10,2	0,92
<b>Среднее арифметическое для 7-суточного возраста:</b>				<b>11,5 ± 2,1</b>	<b>13,9 ± 2,1</b>	<b>0,83 ± 0,1</b>
<b>Коэффициент вариации для 7-суточного возраста:</b>				<b>17,2 %</b>	<b>14,3 %</b>	<b>13,3 %</b>
11 (14)	946	3,2	0,18	19,3	18,0	1,07
12 (14)	892	2,8	0,21	18,2	13,5	1,35
13 (14)	882	3,0	0,18	18,0	16,8	1,07
14 (14)	755	2,5	0,17	15,4	14,7	1,05
15 (14)	872	2,7	0,20	17,8	13,6	1,31
16 (14)	882	2,9	0,21	18,0	13,9	1,29
<b>Среднее арифметическое для 14-суточного возраста:</b>				<b>17,8 ± 1,3</b>	<b>15,1 ± 2,0</b>	<b>1,18 ± 0,1</b>
<b>Коэффициент вариации для 14-суточного возраста:</b>				<b>7,2 %</b>	<b>12,5 %</b>	<b>11,9 %</b>
17 (35)	985	5,4	0,51	20,1	10,6	1,90
18 (35)	1392	8,5	0,48	28,4	17,7	1,60
19 (35)	1073	7,0	0,52	21,9	13,4	1,63
20 (35)	1269	6,8	0,35	25,9	19,5	1,33
21 (35)	907	5,6	0,45	18,5	12,4	1,49
22 (35)	882	6,2	0,45	18,0	13,7	1,31
<b>Среднее арифметическое для 35-суточного возраста:</b>				<b>22,1 ± 4,4</b>	<b>14,6 ± 3,5</b>	<b>1,52 ± 0,2</b>
<b>Коэффициент вариации для 35-суточного возраста:</b>				<b>18,9 %</b>	<b>23,1 %</b>	<b>14,4 %</b>
23 (101)	1470	7,8	0,51	30,0	15,2	1,97
24 (101)	1333	7,7	0,45	27,2	17,1	1,59
25 (101)	1274	5,9	0,42	26,0	14,0	1,86
26 (101)	1171	6,1	0,38	23,9	16,0	1,49
27 (101)	1225	5,6	0,37	25,0	15,0	1,67
28 (101)	1299	6,2	0,42	26,5	14,8	1,79
<b>Среднее арифметическое для 101-суточного возраста:</b>				<b>26,4 ± 2,2</b>	<b>15,4 ± 1,1</b>	<b>1,72 ± 0,2</b>
<b>Коэффициент вариации для 101-суточного возраста:</b>				<b>7,9 %</b>	<b>7,0 %</b>	<b>10,3 %</b>

### Обсуждение результатов исследований

По результатам прессометрических испытаний разновозрастных бетонных образцов отстроены диаграммы, отражающие зависимости прочностных и деформационных свойств бетона от возраста. На рис. 1 и 2 представлены, соответственно, замеренные значения призмной прочности  $R_{пр}$  и начального модуля упругости  $E$ , которые были сопоставлены с нормативными показателями кинематики твердения, отражающими темпы набора бетоном класса  $B 25$  табличных значений прочности и модуля упругости.

Для бетона класса  $B 25$  в возрасте 28 сут табличная призмная прочность составляет  $R_{пр(28сут)} = 18,75$  МПа: 75 % от его нормативной кубиковой прочности  $R_{(28сут)} = 25$  МПа, полученной с обеспеченностью прочностных свойств 95 % при испытаниях стандартных бетонных кубов с размерами ребра 15 см в нормальных условиях. Математические же зависимости, определяющие изменение прочности тяжелых видов бетонов на портланд-цементы в разные моменты времени при различных условиях твердения регламентируются ГОСТ 22783-2022 «Бетоны. Методы прогнозирования прочности на сжатие». В соответствии с данным ГОСТом набор призмной прочности  $R_{пр}$  в нормальных условиях происходит в соответствии с зависимостью

$$R_{пр} = 0,7 R_{пр(28сут)} \lg t, \quad (6)$$

где  $R_{пр(28сут)}$  – призмная прочность бетона в возрасте 28 сут, МПа;

$t$  – текущий возраст бетона, сут.

На диаграмме рис. 1 кинематика твердения «табличного» бетона  $B 25$  по нормативной зависимости (6) представлена сплошной кривой, которая находится в пределах доверительного интервала среднеарифметических замеренных значений  $R_{пр}$  с обеспеченностью 95 % как для образцов бетона из ствола (см. табл. 1), так и для контрольных образцов-призм (см. табл. 3). Несущественны и различия среднеарифметических замеренных значений  $R_{пр}$  этих двух групп образцов между собой, поскольку внутригрупповые их дисперсии существенно превышают межгрупповые.

Сложнее обстоит дело с нормативными значениями модулей упругости бетона, которые сильно зависят не только от условий твердения, но и от множества других факторов, основными из которых являются крупность и состав заполнителя. Таблица в СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения» демонстрирует 37-процентный разброс значений начальных модулей упругости тяжелого бетона класса  $B 25$ : от 30 ГПа – для условий естественного твердения, до 19 ГПа – для «бетона мелкозернистого группы D, подвергнутого тепловой обработке при атмосферном давлении». В этой связи следует напомнить, что при изготовлении контрольных бетонных призм в соответствии с ГОСТ максимальную крупность зерен щебеночного заполнителя искусственно ограничивают 20 миллиметрами, а в реальных бетонных крепях заполнитель существенно крупнее.

Также до сих пор не выработаны общепризнанные нормативы и для темпов набора бетонами упругих свойств. В СССР (и в настоящее время в России) строительные механики для цели их прогнозирования чаще всего использовали формулу Н.Х. Арутюняна [9]:

$$E = E_{дл} (1 - \beta e^{-\alpha t}), \quad (7)$$

где  $t$  – текущий возраст бетона, сут;

$E$  – начальный модуль упругости бетона в возрасте  $t$ , ГПа;

$E_{дл}$  – начальный модуль упругости бетона в длительном возрасте, ГПа;

$\alpha = 0,056 \div 0,129$  сут<sup>-1</sup>;  $\beta = 0,5 \div 0,575$  – эмпирические коэффициенты, зависящие от класса бетона, подвижности бетонной смеси (осадки конуса), крупности и состава щебеночного заполнителя и множества других факторов. При этом сложности задания этих коэффициентов, обусловленные их изменчивостью, признавались самими авторами [10].

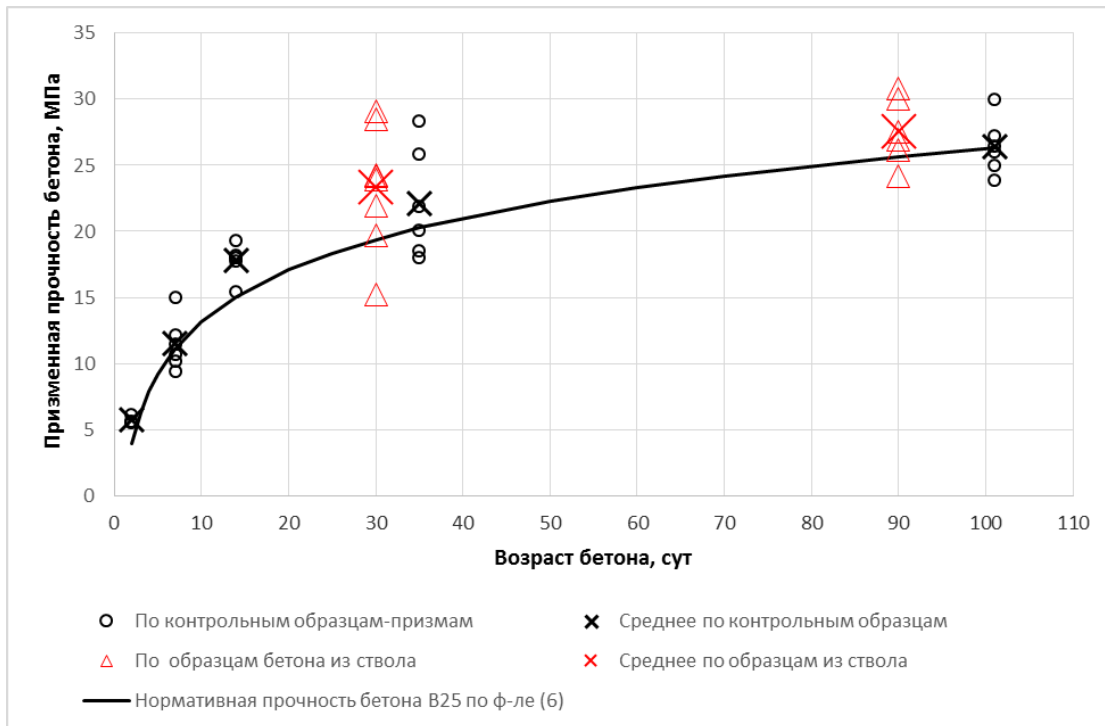


Рис. 1. Зависимость между возрастом бетона и его призмной прочностью  $R_{пр}$

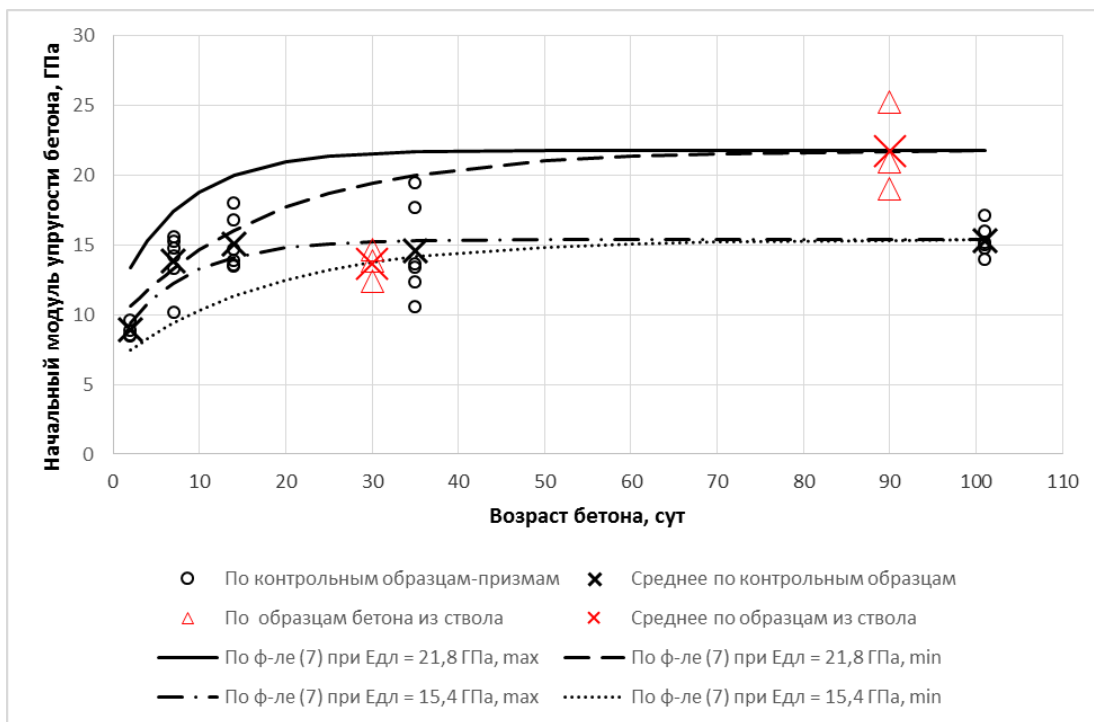


Рис. 2. Зависимость между возрастом бетона и его начальным модулем упругости  $E$

В ряде учебников, в частности, оценку модуля упругости бетона  $E(t)$  на ранних стадиях твердения (в диапазоне возрастов от 1 до 180 сут) предлагается осуществлять также и по эмпирической зависимости [11]:

$$E = \frac{100}{1,7 + \frac{360}{\chi(\ln \frac{t}{180} + 5,2)}}$$



Однако эта зависимость никак не привязана к асимптотическим показателям модуля упругости бетона в длительном возрасте, и практическое ее применение затруднено вследствие еще больших, чем у формулы (7), сложностей при задании эмпирического коэффициента  $\chi$ .

С учетом вышеизложенного для целей рассматриваемых исследований замеренные модули упругости разновозрастных образцов сопоставлялись с расчетными значениями  $E$ , определенными по формуле (7) для всего диапазона вариативности эмпирических коэффициентов: от обеспечивающих минимальные показатели упругости  $\alpha = 0,129 \text{ сут}^{-1}$  и  $\beta = 0,5$ ,  $E(t)$ , до  $\alpha = 0,056 \text{ сут}^{-1}$  и  $\beta = 0,575$ , дающих максимальные  $E$ .

Для значений модуля упругости бетона  $B 25$  в длительном возрасте  $E_{\text{дл}}$  также рассматривались два варианта, принятые с учетом фактически замеренных среднеарифметических показателей:  $E_{\text{дл}} = 15,4 \text{ ГПа}$ , полученных по бетонным образцам-призмам в возрасте 101 сут (см. табл. 3), и  $E_{\text{дл}} = 21,8 \text{ ГПа}$ , определенных по стволным бетонным образцам в возрасте 90 сут (см. табл. 2).

Отстроенные таким образом по формуле (7) кривые, отражающие весь возможный диапазон темпов набора бетоном класса  $B 25$  расчетных значений начального модуля упругости, приведены на рис. 2. Сопоставление их с фактически замеренными значениями  $E$  показывает, что формально все кривые находятся в пределах доверительного интервала среднеарифметических значений  $E$  с обеспеченностью 95 %. Это касается как образцов бетона из ствола (см. табл. 2), так и контрольных образцов-призм (см. табл. 3). И также, как и для  $R_{\text{пр}}$ , различия в замеренных среднеарифметических значениях  $E$  между этими двумя статистическими совокупностями являются несущественными.

Вместе с тем рассмотрение зависимости между возрастом бетона и отношением его призмной прочности  $R_{\text{пр}}$  (в МПа) к модулю упругости  $E$  (в ГПа), представленной на рис. 3, свидетельствует о значимом превышении отношений  $R_{\text{пр}} / E$  для показателей, замеренных в возрасте 30 – 35 сут, по сравнению с соотношением аналогичных показателей для расчетных значений, полученных по формулам (6) и (7). Особенно явно это превышение проявляется для образцов бетона из ствола (рис. 3).

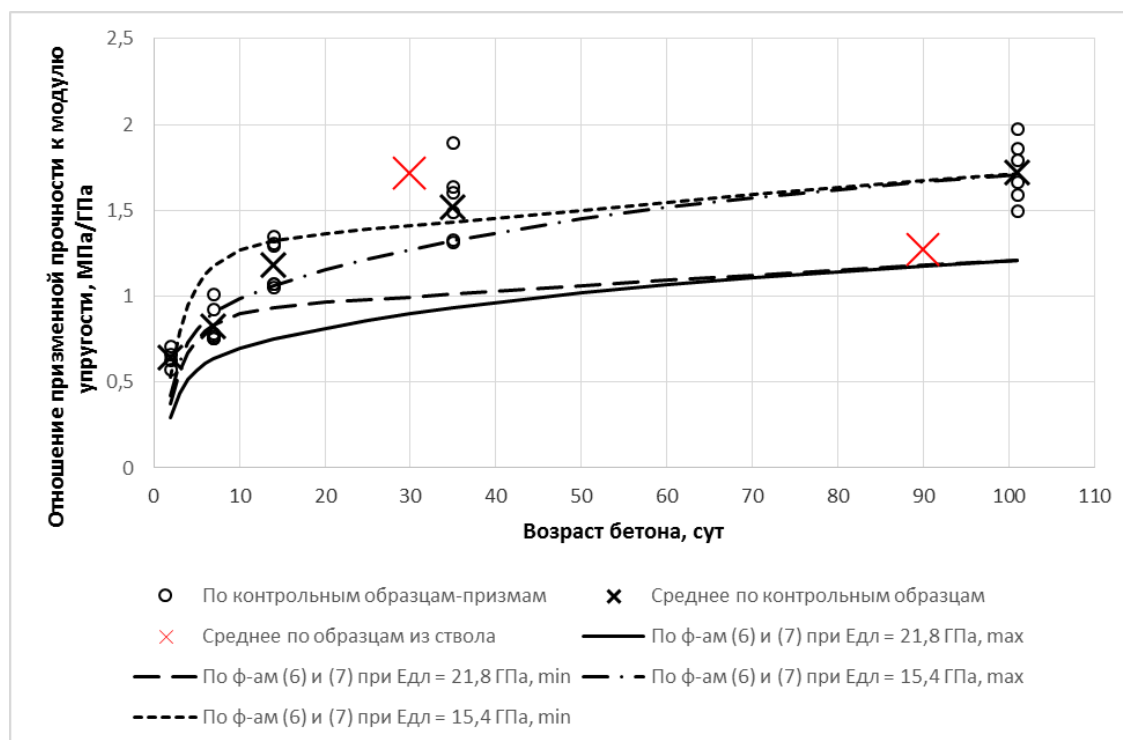


Рис. 3. Зависимость между возрастом бетона и отношением его призмной прочности  $R_{\text{пр}}$  (представленной в МПа) к модулю упругости  $E$  (в ГПа)

Для возрастов порядка 30 – 35 сут характерен и повышенный коэффициент вариации (причем также по обеим группам образцов), достигающий 23,1 % для модуля упругости 35-суточного бетона контрольных образцов. В то время как на начальных стадиях твердения, так и в его конце (для 101 сут), этот коэффициент не превышал 10 - 15 % (см. табл. 3).

На основании вышеизложенного можно заключить, что отклонения экспериментальных данных от нормативных показателей кинематики твердения свидетельствуют о ее неравномерности во времени и о существенных различиях в темпах набора прочностных и деформационных свойств бетона в разных его участках – объемах. Следует особо отметить, что это проявляется не только при твердении монолитной бетонной крепи в шахтных условиях, но и при твердении контрольных бетонных образцов в нормальных температурно-влажностных условиях в лаборатории.

По этой причине и данные склерометрии для бетона ствола «Вентиляционный» на ранних сроках твердения не соответствовали значениям прочности, получаемым при испытаниях образцов (из тех же участков крепи) на прессе. Так, для возраста 30 сут средние (с коэффициентом вариации 25 – 35 %) значения кубиковой прочности бетона ствола по показаниям склерометра составляли около 10 МПа, а по данным прессометрических испытаний –  $31,2 \pm 5,0$  МПа (см. табл. 1). То же для возраста 90 сут, соответственно: 16 МПа и  $36,8 \pm 3,4$  МПа. И лишь в возрасте крепи порядка 180 – 200 сут показатели склерометра начинали коррелироваться с результатами прессометрических испытаний и нормативными значениями кубиковой прочности бетона В 25. А поскольку по своей физической сути показания склерометра отражают не столько прочностные, сколько упругие свойства испытуемого материала, то можно сделать вывод, что бетон на ранних этапах твердения набирал упругие свойства относительно более медленными темпами, чем прочностные.

Это подтверждает сопоставительный анализ зависимостей, представленных на рис. 1 и 2, который показывает, что в целом темпы набора бетоном упругих свойств ниже, чем прочностных, однако на ранних стадиях твердения эти темпы относительно еще более низкие, в особенности в возрасте 30 – 35 сут. Данный эффект является положительным фактором, поскольку способствует уходу крепи от нагрузок. В процессе ухода забоя выработки большая часть конвергенции ее породных стенок реализуется в условиях пластичной деформации, и уровень напряжений в бетонной крепи оказывается меньшим, чем в бетоне, уже набравшем жесткость.

Экспериментальное подтверждение данного эффекта в свое время было получено в процессе строительства ствола «Вентиляционный», когда на глубине 602 м проходка была приостановлена и снова возобновлена спустя 6 месяцев. При возобновлении проходки ствола ИГД УрО РАН замерами методом шелевой разгрузки был зафиксирован существенный прирост напряжений прилегающего участка бетонной крепи, утратившей за это время пластичность [12].

Таким образом, при проходке шахтных стволов повышенная податливость бетона на ранних стадиях твердения частично используется естественным образом. При средней скорости углубки ствола около 30 м в месяц основные деформации породных стенок бетон воспринимает в течение первых двух недель после возведения крепи. И поскольку в этом возрасте бетон обладает повышенной естественной пластичностью, то это обеспечивает его уход из-под нагрузки без нарушения сплошности и снижения несущей способности крепи. Очевидно, что в условиях скоростных проходок этот эффект проявляется еще больше.

Однако естественная податливость монолитной бетонной крепи в раннем возрасте может быть усилена еще больше путем целенаправленного замедления темпов набора бетоном упругих свойств, при сохранении темпов набора прочностных, за счет введения в бетонную смесь пластифицирующих добавок. При этом прочность крепи не

только не снизится, но даже несколько увеличится за счет повышения удобоукладываемости бетонной смеси за опалубку, что позволит уменьшить расход воды затворения.

Анализ литературных источников о добавках к бетонной смеси показывает, что сейчас для пластифицирования бетона чаще всего применяют концентрат сульфидно-дрожжевой бражки в количестве 0,15 – 0,25 % от массы цемента, суперпластификатор ПАЩ-1 в количестве 0,1 – 0,2 %, а также продукты конденсации нафталиносульфоокислоты С-3 или С-4 ("Дофен") в количестве от 0,2 до 1,2 % от массы цемента [13 – 15]. В соответствии с ГОСТ 23732-2011 «Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия» и ГОСТ 24211-2008 «Добавки для бетонов. Общие технические требования» при стандартно применяемых дозировках указанные добавки являются эффективным пластификатором незатвердевшей бетонной смеси, которые позволяют уменьшить расход цемента и воды без снижения прочности бетона [16 – 17]. При повышенных же дозах (до 0,5 – 0,6 % от массы цемента), судя по описаниям, они становятся эффективным пластификатором также и для уже частично затвердевшего бетона, способствуя изменениям формы и уменьшению размеров кристаллов новообразований в цементном камне, а также увеличивая воздухоовлечение в бетонную смесь, изменяя пористую структуру бетона. Увеличение содержания вовлеченного воздуха в уплотненной бетонной смеси практически не повышает общей пористости затвердевшего бетона, поскольку в бетонных смесях равной подвижности при неизменном В/Ц уменьшается масса цементного теста, а следовательно, сокращается и объем пористости, приходящийся в бетоне на долю цементного камня. Все это неизбежно изменяет деформационные характеристики бетона на ранних стадиях твердения в сторону снижения модуля упругости, что благоприятно сказывается на напряженно-деформированном состоянии монолитной бетонной крепи.

#### Заключение

При проведении комплекса натуральных и лабораторных исследований обнаружилось новые, не учитываемые действующими нормативными документами факторы формирования напряжений в монолитных шахтных крепях из тяжелых бетонов на портландцементях. Было экспериментально установлено, что на ранних стадиях твердения (в течение 1 – 1,5 месяцев) бетон набирает упругие свойства относительно более медленными темпами, чем прочностные. С точки зрения влияния на устойчивость крепи это является положительным фактором, поскольку способствует уходу крепи от нагрузок. Для усиления данного эффекта за счет еще большего замедления темпов набора бетоном упругих свойств (при сохранении темпов набора свойств прочностных) рекомендуется применение пластифицирующих добавок.

#### Список литературы

1. Komljenovic, M., 2015. Mechanical strength and Young's modulus of alkali-activated cement-based binders. *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*, № 7, P. 171–215. DOI:10.1533/9781782422884.2.171
2. Xianyu Jin, Zongjin Li, 2003. Effects of Mineral Admixture on Properties of Young Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15(5), 435–442. DOI:10.1061/(asce)0899-1561(2003)15:5(435)
3. ГОСТ 28570-2019. *Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобраным из конструкций*. Москва: Стандартинформ, 2019, 12 с.
4. ГОСТ 24452-2023. *Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона*. Москва: Российский институт стандартизации, 2024, 10 с.
5. ГОСТ 10180-2012. *Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам*. Москва: Стандартинформ, 2013, 30 с.

6. ГОСТ 9696-82. Индикаторы многооборотные с ценой деления 0,001 и 0,002 мм. Технические условия. Москва: ИПК Издательство стандартов, 1984, 6 с.
7. ГОСТ 22690-2015. Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля. Москва: Стандартинформ, 2016, 19 с.
8. ГОСТ 26633-2015. Межгосударственный стандарт. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2019, 11 с.
9. Арутюнян Н.Х., 1952. Некоторые вопросы теории ползучести. Москва: Гостехиздат, 323 с.
10. Арутюнян Н.Х., Зевин А.А., 1988. Расчет строительных конструкций с учетом ползучести. Москва: Стройиздат, 256 с.
11. Булычев Н.С., 1994. Механика подземных сооружений. Москва: Недра, 382 с.
12. Боликов В.Е., Балек А.Е., Бекеев М.М., 2012. Решение геомеханических проблем обеспечения устойчивости горных выработок в шахтах Донского ГОКа. *Горный журнал*, № 1, С. 55- 59.
13. Рамачандран В.С., Фельдман Р.Ф., Коллепарди М. и др., 1988. *Добавки в бетон*: Справ. пособие. Пер. с англ. Москва: Стройиздат, 575 с.
14. Куликова Е.С., Куликова Т.А., Ткаченко А.З., 2019. Добавки в технологии бетона. *Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса*. № 1-3, С. 371-374.
15. Garzon-Agudelo P.A., Palacios-Alvarado W., Medina-Delgado B., 2021. Impact of plasticizers on the physical and structural properties of concrete used in constructions. *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 2046 DOI:10.1088/1742-6596/2046/1/012069
16. ГОСТ 23732-2011. Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2012, 11 с.
17. ГОСТ 24211-2008. Добавки для бетонов. Общие технические требования. Москва: Стандартинформ, 2010, 11 с.

## References

1. Komljenovic, M., 2015. Mechanical strength and Young's modulus of alkali-activated cement-based binders. *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*, № 7, P. 171–215. DOI:10.1533/9781782422884.2.171
2. Xianyu Jin, Zongjin Li, 2003. Effects of Mineral Admixture on Properties of Young Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15(5), P. 435–442. DOI:10.1061/(asce)0899-1561(2003)15:5(435)
3. GOST 28570-2019. Betony. Metody opredeleniya prochnosti po obraztsam, otobranym iz konstruksii . [Concrete. Methods for determining strength from samples selected from structures]. Moscow: Standartinform, 2019, 12 p.
4. GOST 24452-2023. Betony. Metody opredeleniya prizmennoi prochnosti, modulya uprugosti i koeffitsienta Puassona [Concrete. Methods for determining the prismatic strength, modulus of elasticity and Poisson's efficiency]. Moscow: Rossiiskii institut standartizatsii, 2024, 10 p.
5. GOST 10180-2012. Betony. Metody opredeleniya prochnosti po kontrol'nym obraztsam [Concrete. Methods for determining strength from control samples]. Moscow: Standartinform, 2013, 30 p.
6. GOST 9696-82. Indikatory mnogooborotnye s tsenoi deleniya 0,001 i 0,002 mm. Tekhnicheskie usloviya . [The indicators are diverse with a division price of 0.001 and 0.002 mm. Technical conditions]. Moscow: IPK Izdatel'stvo standartov, 1984, 6 p.
7. GOST 22690-2015. Betony. Opredelenie prochnosti mekhanicheskimi metodami nerazrushayushchego kontrolya [Concrete. Determination of strength by mechanical methods

of non-destructive testing]. Moscow: Standartinform, 2016, 19 p.

8. GOST 26633-2015. Mezhgosudarstvennyi standart. Betony tyazhelye i melkozernisty. Tekhnicheskie usloviya. [Interstate standard. Heavy and fine-grained concretes. Technical conditions]. Moscow: Standartinform, 2019, 11 p.

9. Arutyunyan N.Kh., 1952. Nekotorye voprosy teorii polzuchesti [On some issues of the theory of creep]. Moscow: Gos-tekhizdat, 323 p.

10. Arutyunyan N.Kh., Zevin A.A., 1988. Raschet stroitel'nykh konstruksii s uchetom polzuchesti [Calculation of building structures taking into account the creep]. Moscow: Stroiizdat, 256 p.

11. Bulychev N.S., 1994. Mekhanika podzemnykh sooruzhenii [Mechanics of underground structures]. Moscow: Nedra, 382 p.

12. Bolikov V.E., Balek A.E., Bekeev M.M., 2012. Reshenie geomekhanicheskikh problem obespecheniya ustoichivosti gornyx vyrabotok v shakhtakh Donskogo GOKa [Solving geomechanical problems of ensuring the stability of mining operations in the mines of Donskoy GOK]. Gor-nyi zhurnal, № 1, P. 55- 59.

13. Ramachandran V.S., Fel'dman R.F., Kolleparidi M. i dr., 1988. Dobavki v beton: [Additives in concrete:] Sprav. posobie . Per. s angl. Moscow: Stroiizdat, 575 p.

14. Kulikova E.S., Kulikova T.A., Tkachenko A.Z., 2019. Dobavki v tekhnologii betona. [Additives in concrete technology]. Dal'nyi Vostok: problemy razvitiya arkhitekturno-stroitel'nogo kompleksa. № 1-3, P. 371-374.

15. Garzon-Agudelo P.A., Palacios-Alvarado W., Medina-Delgado B., 2021. Impact of plasticizers on the physical and structural properties of concrete used in constructions. *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 2046 DOI:10.1088/1742-6596/2046/1/012069/

16. GOST 23732-2011. Voda dlya betonov i stroitel'nykh rastvorov. Tekhnicheskie usloviya [Water for concrete and mortars. Technical conditions]. Moscow: Standartinform, 2012, 11 p.

17. GOST 24211-2008. Dobavki dlya betonov. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya [Additives for concrete. General technical requirements]. Moscow: Standartinform, 2010, 11 p.