

УДК 691.32

ББК 38.33

М-14

Маилян Дмитрий Рафаэлович, доктор технических наук, профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций ФГБОУ ВПО «Ростовский государственный строительный университет»;

Хомич Леонид Анатольевич, аспирант ФГБОУ ВПО «Ростовский государственный университет»;

Блягоз Алик Моссович, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных и общепрофессиональных дисциплин ФГБОУ ВПО «Майкопский государственный технологический университет».

ИЗМЕНЕНИЕ ДЕФОРМАТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОПРОЧНОГО БЕТОНА ПОСЛЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОБЖАТИЯ
(рецензирована)

В статье рассматриваются изменения деформативных свойств высокопрочного бетона после предварительного обжатия. Предложенные регрессионные зависимости для оценки этого явления.

Ключевые слова: предварительное обжатие, высокопрочные бетоны, деформативные свойства.

Mailyan Dmitry Rafaelovich, professor of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures of FSBEI HPE "Rostov State University of Civil Engineering";

Khomich Leonid Anatolievich, postgraduate of FSBEI HPE "Rostov State University";

Blyagoz Alec Mossovich, Candidate of Technical Sciences, assistant professor of the Department of Construction and General Professional disciplines of FSBEI HPE "Maikop State Technological University".

ALTERATION OF DEFORMATION CHARACTERISTICS OF HIGH-STRENGTH CONCRETE AFTER PRE-COMPRESSION
(reviewed)

The article discusses the changes of deformability properties of concrete after preliminary compression. Regression correlations to evaluate this phenomenon have been proposed.

Keywords: pre-compression, high-strength concrete, deformation properties.

Проведенные в РГСУ исследования показали влияние на деформативные свойства высокопрочных бетонов предварительного обжатия.

При первичном обжатии (рис. 1, кривая АБ) и последующим выдерживании при убывающем напряжении (кривая БВ) в высокопрочном бетоне развиваются неупругие деформации. При полной разгрузке элемента после восстановления упругих деформаций и проявления эффекта упругого последствия (отрезок ГД) в бетоне сохраняются отжатые деформации (отрезок АД). В результате при повторном нагружении этого элемента его упруго-пластические свойства претерпевают существенные изменения – возрастает модуль упругости ($\alpha_1 > \alpha$, см. рис. 1), уменьшаются деформации, возрастают коэффициенты упругости.

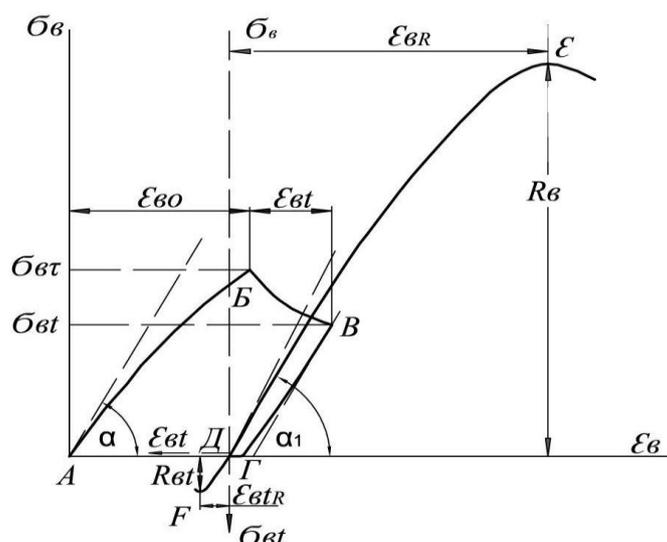


Рис. 1 – Изменение деформаций бетона при предварительном обжатии (АВ), выдерживании в обжатом состоянии (БВ), разгрузке (ВГ), отдыхе (ГД) и последующем кратковременном сжатии (ДЕ) или растяжении (ДФ)

Результаты проведенных нами опытов (табл. 1) показали, что деформации высокопрочного бетона при обжатии $\varepsilon_{\beta 0}$, выдержке в обжатом состоянии $\varepsilon_{\beta t}$ и необратимые (после разгрузки $\varepsilon_{\beta T}$ зависят от уровня обжатия, возраста при обжатии и продолжительности обжатия).

Как видно из табл. 1 при испытании опытных образцов повышение уровня обжатия η_{τ} с 0,15 до 0,55 при прочих равных условиях привело к увеличению указанных деформаций в несколько раз. С увеличением возраста высокопрочного бетона при обжатии эти деформации уменьшаются. Так, сравнивая результаты испытания можно отметить, что увеличение τ с 12 суток до 50 суток привело к уменьшению $\varepsilon_{\beta 0}$ в среднем в 1,3 раза, $\varepsilon_{\beta t}$ – в 1,9 раза, $\varepsilon_{\beta T}$ – в 1,7 раза. Менее заметно сказывается влияние продолжительности обжатия – при увеличении ее с 8 до 70 суток $\varepsilon_{\beta t}$ возросло в 1,2 раза, а $\varepsilon_{\beta T}$ – в 1,1 раза.

Таблица 1 - Показатели деформативности бетонных образцов в процессе обжатия и последующего кратковременного нагружения (средние по 3 образцам-близнецам)

Шифр групп образцов	Деформации в процессе обжатия $\varepsilon \cdot 10^5$			Характеристики при кратковременном испытании после длительного обжатия					
	$\varepsilon_{\beta 0}$	$\varepsilon_{\beta t}$	$\varepsilon_{\beta T}$	при сжатии			при растяжении		
				$\varepsilon_{\beta} \cdot 10^5$	$E_{\beta} \cdot 10^{-3}$ МПа	$\bar{\nu}$	$\varepsilon_{\beta t} \cdot 10^5$	$E_{\beta t} \cdot 10^{-3}$ МПа	$\bar{\nu}_t$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
В-1-50-8	24	8	13	173,6	36,22	0,714	13,16	33,02	0,545
В-2-50-8	70	18	33	171,1	36,4	0,735	11,73	33,02	0,546
В-3-50-8	105	21	43	169,4	36,4	0,737	10,26	32,5	0,555
В-1-50-70	24	9	14	171,5	36,4	0,716	13,12	33,09	0,547
В-2-50-70	70	22	37	169,4	36,5	0,744	11,45	33,58	0,548
В-3-50-70	105	27	49	165,9	36,58	0,752	9,72	33,09	0,563
В-0-0-0	-	-	-	174,6	36,22	0,692	13,5	32,76	0,541

B-0-0-0	-	-	-	174,6	36,22	0,692	13,5	32,76	0,541
BA-1-7-70	45	27	45	168,9	39,04	0,774	11,06	36,55	0,547
BA-2-7-70	120	57	107	151,5	41,22	0,909	7,75	37,73	0,653
BA-1-10-70	37	21	35	171,1	38,46	0,757	11,57	35,83	0,567
BA-2-10-70	104	47	89	155,9	40,22	0,881	8,33	36,75	0,627
BA-1-14-70	29	15	26	172,9	37,39	0,753	12,08	35,17	0,557
BA-2-14-70	85	37	72	161,8	38,36	0,861	9	36,29	0,617
BA-0-0-0	-	-	-	178,2	35,78	0,7	13,81	32,81	0,543
BA-0-0-0	-	-	-	178,2	35,78	0,7	13,81	32,81	0,543
BB-1-12-8	32	15	27	179,4	41,24	0,75	13,06	36,62	0,567
BB-2-12-8	92	32	44	172,9	42,5	0,825	10,62	37,78	0,613
BB-3-12-8	145	42	79	162,9	42,7	0,882	8,5	37,5	0,657
BB-1-12-70	33	18	55	176,5	41,67	0,763	12,54	37,5	0,572
BB-2-12-70	93	45	105	164,5	43,09	0,866	9,58	38,47	0,624
BB-3-12-70	142	62	120	152,3	43,32	0,945	7,33	38,47	0,686
BB-0-0-0	-	-	-	181,8	39,35	0,71	14,51	34,88	0,552
BB-0-0-0	-	-	-	181,1	39,35	0,71	14,51	34,88	0,522
BГ-1-14-8	30	12	22	183,7	41,81	0,75	13,72	37,25	0,561
BГ-2-14-8	88	30	70	177,8	42,94	0,825	11,19	38,32	0,615
BГ-3-14-8	132	40	88	171,3	43,06	0,863	9,48	37,82	0,641
BГ-1-14-70	30	16	40	181,1	42,29	0,759	13,26	37,97	0,562
BГ-2-14-70	87	40	80	170,6	43,31	0,867	9,93	39,22	0,629
BГ-3-14-70	130	55	101	160,2	43,47	0,931	8,11	38,61	0,667
BГ-0-0-0	-	-	-	185,2	40,55	0,714	14,82	35,65	0,555
BГ-0-0-0	-	-	-	185,2	40,55	0,714	14,82	35,65	0,555

Примечание: Деформации ε_{β} , $\varepsilon_{\beta t}$ и коэффициенты упругости $\bar{\nu}$ и $\bar{\nu}_t$ даны при разрушающих напряжениях.

По результатам кратковременного испытания бетонных призм – восьмерок после их длительного обжатия была установлена степень изменения предельных деформаций высокопрочного бетона, модуля упругости и коэффициента упругости

(при $\sigma_{\beta t} \sim R_{\beta t}$). По значениям указанных характеристик, приведенных в таблице 1, были определены коэффициенты $K_{\varepsilon \beta t} \cdot K_{E \beta t} \cdot K_{\nu t}$ и влияние на них основных факторов (табл. 2).

Используя методику планирования эксперимента, были получены следующие уравнения регрессии, выражающие зависимость указанных коэффициентов от уровня обжарки η_{τ} и возраста при обжарке τ . Продолжительность обжарки $t - \tau$ принята постоянной и равной 70 сут., ее влияние рассмотрено отдельно.

$$K_{\varepsilon \beta t} = \frac{\varepsilon_{\beta t}^{\alpha}}{\varepsilon_{\beta t}} = 0,7794 - 0,3685\eta(1,9 + \eta) + 2,318 \cdot 10^{-4}\tau \cdot (72,56 - \tau) + 7,6786 \cdot 10^{-3}\eta\tau \quad (1)$$

$$K_{E \beta t} = \frac{E_{\beta t}^{\alpha}}{E_{\beta t}} = 11,23 + 0,4808\eta(0,806 - \eta) - 1,013 \cdot 10^{-4}\tau \cdot (79,5 - \tau) - 1,25 \cdot 10^{-3}\eta\tau \quad (2)$$

$$K_{\nu t} = \frac{\nu_t^{\alpha}}{\nu_t} = 1,0486 + 0,255\eta(2,05 + \eta) - 1,66 \cdot 10^{-4}\tau \cdot (47,77 - \tau) - 1,482 \cdot 10^{-2}\eta\tau \quad (3)$$

В этих уравнениях коэффициенты множественной корреляции оказались равными соответственно 0,993; 0,998 и 0,978, а расчетные значения критерия Фишера 4,35; 5,8 и 3,9, что меньше теоретического равного 19,2. Эти уравнения достаточно хорошо описывают опытные данные при $\eta_{\tau} = 0,1 \dots 0,55$ и $\tau = 7 \dots 50$ сут. (рис. 2-5).

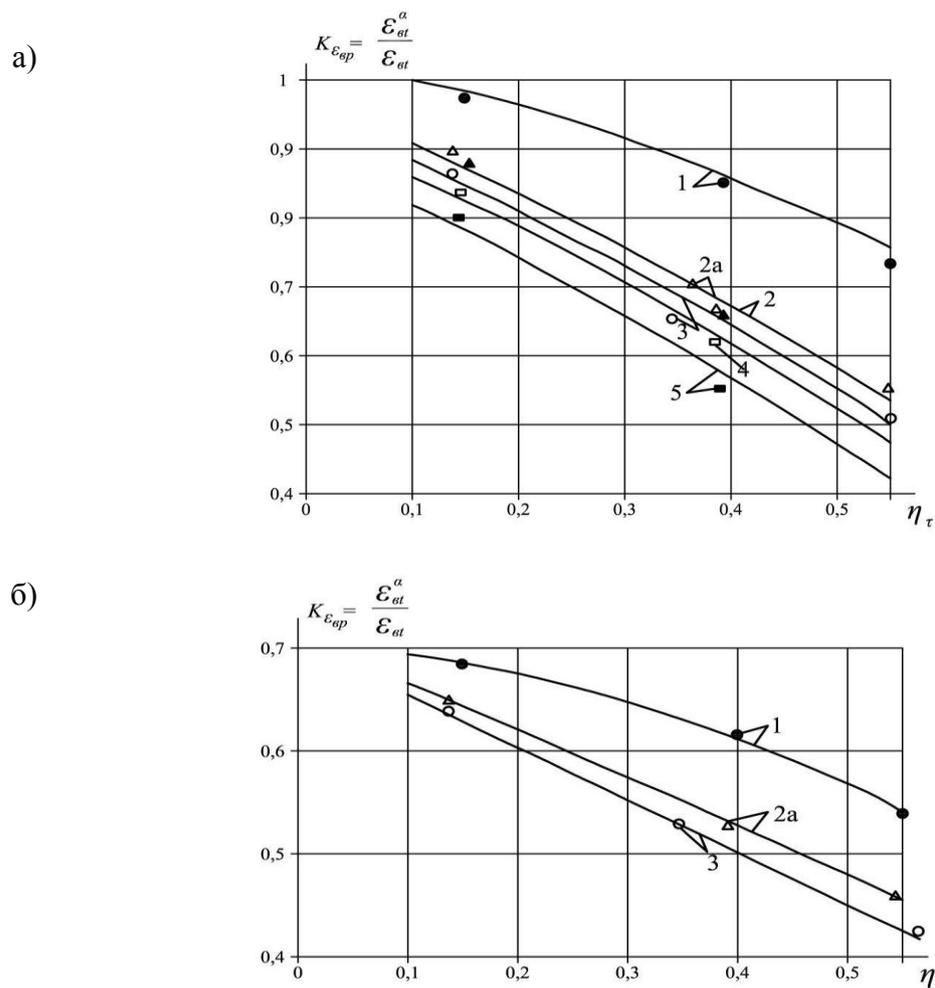


Рис. 2 – Изменение предельной растяжимости бетона, вызванное предварительным обжатием:

а – при $t-\tau = 70$ сут.; кривые – по формуле (2.20), точки – по опытным данным;

б – при $t-\tau = 8$ сут.; точки и кривые – по опытным данным;

1 – $\tau = 50$ сут.; $R = 80$ МПа;

2 – $\tau = 14$ сут.; $R = 80$ МПа;

2a – $\tau = 14$ сут.; $R = 90$ МПа;

3 – $\tau = 12$ сут.; $R = 90$ МПа;

4 – $\tau = 10$ сут.; $R = 80$ МПа;

5 – $\tau = 7$ сут.; $R = 80$ МПа.

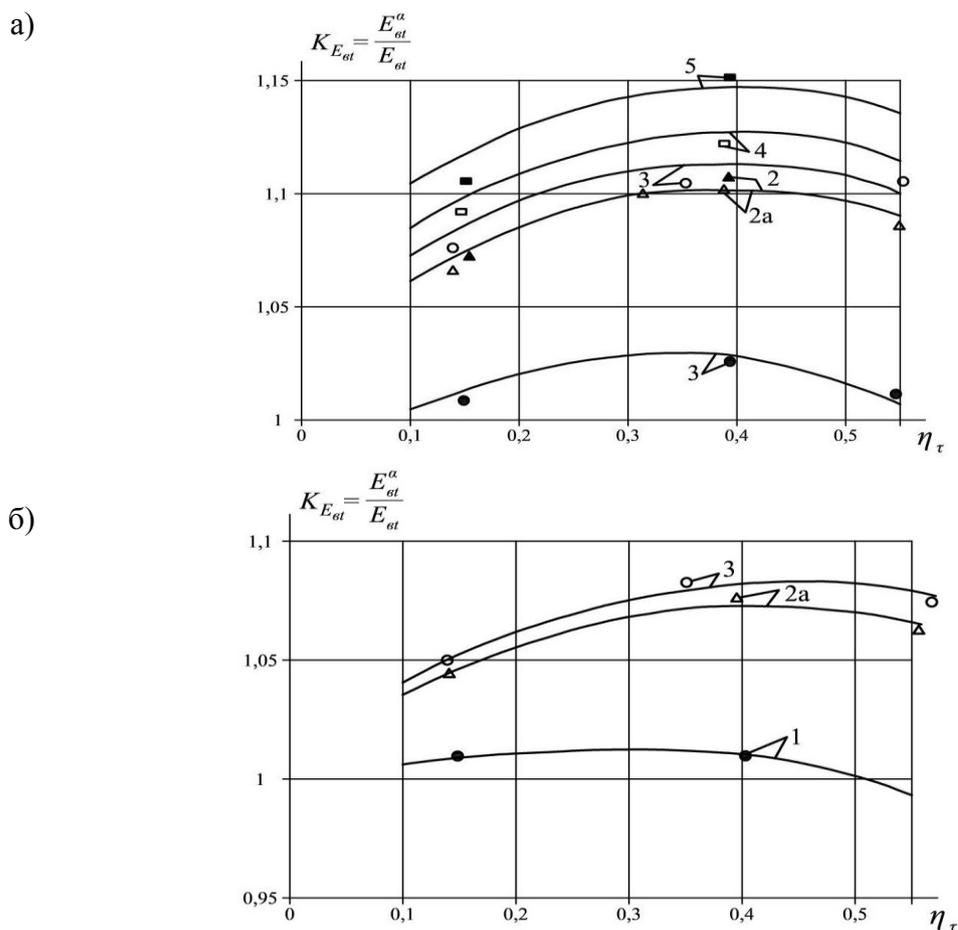


Рис. 3 – Изменение модуля упругости бетона при растяжении вызванное предварительным обжатием:

а - при $t-\tau = 70$ сут.; кривые - по формуле 1, точки - по опытным данным;

б - при $t-\tau = 8$ сут.; точки и кривые - по опытным данным;

1 – $\tau = 50$ сут.; $R = 80$ МПа;

2 – $\tau = 14$ сут.; $R = 80$ МПа;

2а – $\tau = 14$ сут.; $R = 90$ МПа;

3 – $\tau = 12$ сут.; $R = 90$ МПа;

4 – $\tau = 10$ сут.; $R = 80$ МПа;

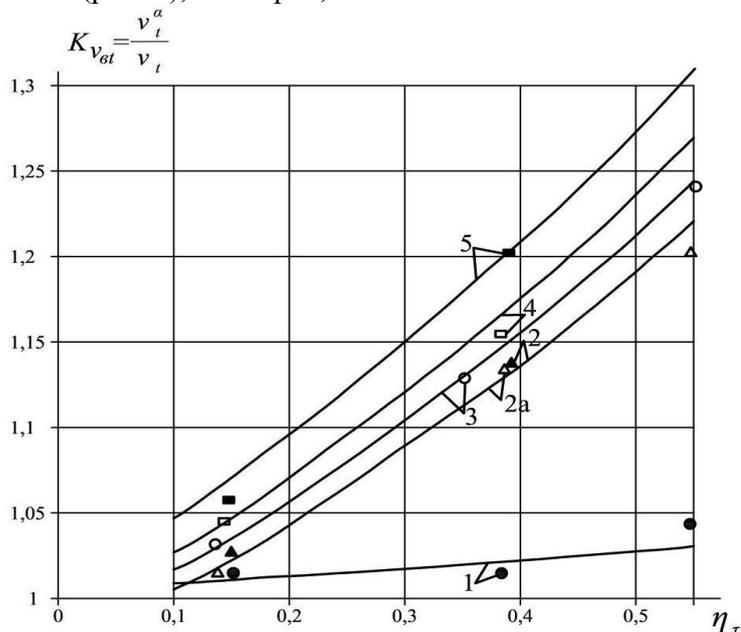
5 – $\tau = 7$ сут.; $R = 80$ МПа.

Приведенные данные показывают, что с увеличением уровня обжатия коэффициент $K_{\epsilon t}$ и деформации при растяжении обжатого бетона уменьшаются, так как увеличивается отжатая часть деформации при предварительном сжатии (рис. 2). Это ведет также к повышению модуля упругости бетона при растяжении. Увеличение последнего наблюдается при повышении уровня обжатия η_{τ} до 0,4, при дальнейшем повышении обжатия вследствие образования микротрещин в бетоне возможно некоторое уменьшение его в сравнении с максимальными значениями (рис. 3). Коэффициенты упругости бетона при растяжении $K_{\nu t}$ с увеличением η_{τ} возрастают (рис. 4), так как предварительное обжатие повышает упругость высокопрочного бетона. С повышением высокопрочного бетона к моменту обжатия эффект его воздействия снижается (рис. 5) – все указанные коэффициенты стремятся к единице.

Длительные действия сжимающей нагрузки приводят к существенному

уменьшению предельных деформаций сжатия при следующем после отдыха кратковременном испытании на сжатие. Из рисунка 6 видно, что коэффициент $K_{\varepsilon\sigma}$, равный отношению деформаций обжатого бетона к необжатому, заметно снижается с повышением уровня предварительного обжатия. Значение же модулей упругости (рис. 7), а также коэффициентов упругости (рис. 8), наоборот, повышаются.

а)



б)

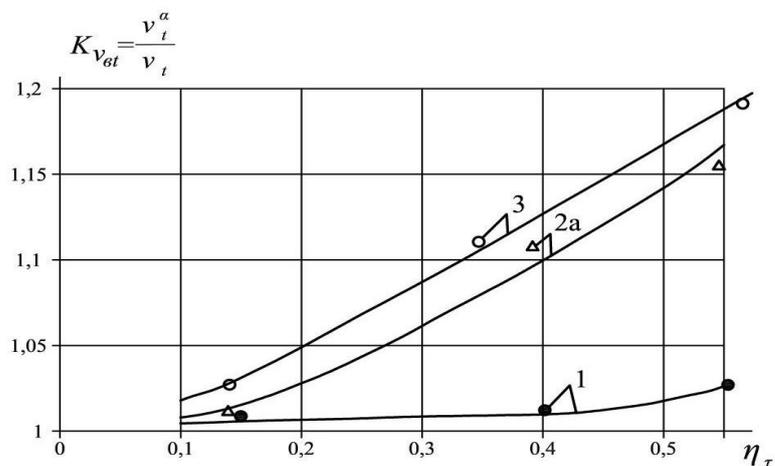


Рис. 4 – Изменение коэффициента упругости бетона при растяжении, вызванное предварительным обжатием:

а - при $t-\tau = 70$ сут.; кривые - по формуле 1, точки - по опытным данным;

б - при $t-\tau = 8$ сут.; точки и кривые - по опытным данным;

1- $\tau = 50$ сут.; $R=80$ МПа;

2- $\tau = 14$ сут.; $R=80$ МПа;

2а- $\tau = 14$ сут.; $R=90$ МПа;

3- $\tau = 12$ сут.; $R=70$ МПа;

4- $\tau = 10$ сут.; $R=80$ МПа;

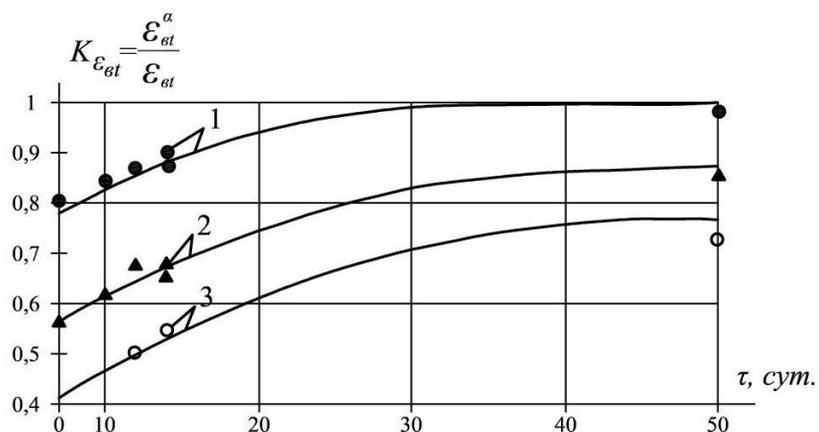
5- $\tau = 7$ сут.; $R=80$ МПа.

При высоком уровне обжатия $\sigma_8 > 0,6R_8$ вследствие образования большого количества микротрещин и их существенного раскрытия, что приводит к разрыхлению структуры высокопрочного бетона, возможно понижение модуля упругости и повышение деформаций в сравнении с их экстремальными значениями при меньших уровнях обжатия.

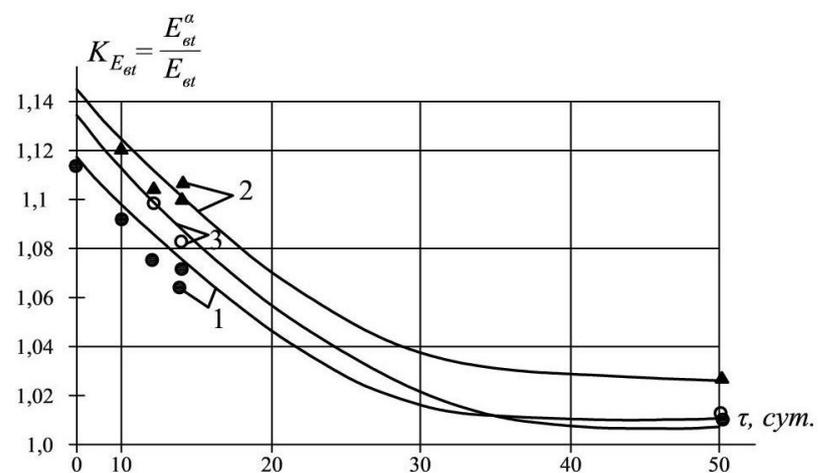
С помощью методики планирования эксперимента было получено уравнение регрессии, отражающее зависимость коэффициента K_ν от уровня обжатия η_τ и возраста бетона при обжатии τ .

$$K_\nu = \frac{\nu^\alpha}{\nu} = 1,021 + 0,285\eta(3,5 - \eta) - 1,17 \cdot 10^{-4}\tau \cdot (49,86 - \tau) - 1,512 \cdot 10^{-2}\eta\tau \quad (4)$$

а)



б)



в)

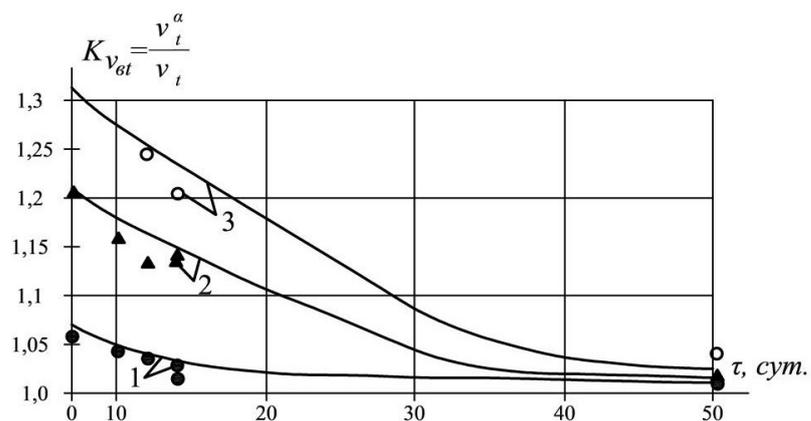


Рис. 5 – Влияние возраста бетона при обжатии τ на изменение его предельной растяжимости (а),

модуля (б) и коэффициента упругости (в) при растяжении
Кривые - по формулам 1, 2 и 3, точки - по опытным данным:

1 - при $\eta = 0,15$; 2 - при $\eta = 0,4$; 3 - при $\eta = 0,55$.

Коэффициент множественной корреляции для полученного уравнения оказался

равным 0,987, а расчетное значение критерия Фишера 2,6, что меньше теоретического равного 19,2. Это уравнение справедливо в интервале $\eta_\tau = 0,1 \dots 0,55$ и $\tau = 7 \dots 50$ сут.

С увеличением возраста бетона коэффициенты $K_{\varepsilon\beta}$; $K_{E\beta}$ и K_{ν} стремятся к единице (рис. 9), поскольку старый бетон отличается законченностью структуры и повышенной упругостью.

Таблица 2 - Изменение деформативных свойств высокопрочного бетона под влиянием предварительного обжатия

Шифр серии образцов	Возраст бетона при обжатии, сут.	Продолжительность обжатия, сут.	Влияние начального уровня обжатия η_τ на показатели деформативных свойств бетона					
			$\frac{\varepsilon_\beta^\alpha}{\varepsilon_\beta}$	$\frac{E_\beta^\alpha}{E_\beta}$	$\frac{\nu^\alpha}{\nu}$	$\frac{\varepsilon_{\beta t}^\alpha}{\varepsilon_{\beta t}}$	$\frac{E_{\beta t}^\alpha}{E_{\beta t}}$	$\frac{\nu_t^\alpha}{\nu_t}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
при $\eta = 0,133 \dots 0,152$								
В	50	8	0,994	1	1,032	0,975	1,008	1,007
		70	0,982	1,005	1,035	0,972	1,01	1,011
ВА	10	7	0,948	1,091	1,105	0,801	1,114	1,057
		70	0,96	1,075	1,082	0,838	1,092	1,045
	14	70	0,97	1,045	1,075	0,875	1,072	1,025
		8	0,987	1,048	1,075	0,9	1,05	1,028
ВВ	12	70	0,971	1,059	1,074	0,864	1,075	1,036
		8	0,992	1,031	1,05	0,926	1,045	1,01
ВГ	14	70	0,978	1,043	1,063	0,895	1,065	0,13
при $\eta = 0,348 \dots 0,408$								
В	50	8	0,98	1,005	1,062	0,869	1,008	1,01
		70	0,97	1,008	1,075	0,848	1,025	1,012
ВА	10	7	0,85	1,152	1,298	0,561	1,15	1,203
		70	0,875	1,124	1,258	0,617	1,12	1,155
	14	70	0,908	1,072	1,230	0,652	1,106	1,137
		8	0,951	1,08	1,162	0,732	1,083	1,11
ВВ	12	70	0,905	1,095	1,22	0,66	1,103	1,13
		8	0,96	1,095	1,156	0,755	1,075	1,108
ВГ	14	70	0,921	1,068	1,215	0,67	1,1	1,134
при $\eta = 0,545 \dots 0,57$								
В	50	8	0,97	1,005	1,066	0,76	0,992	1,026
		70	0,95	1,01	1,086	0,72	1,01	1,04
ВВ	12	8	1,896	1,085	1,242	0,586	1,075	1,191
		70	0,838	1,101	1,331	0,505	1,103	1,242
ВГ	14	8	0,925	1,062	1,208	0,64	1,061	1,155
		70	0,865	1,072	1,304	0,547	1,083	1,202

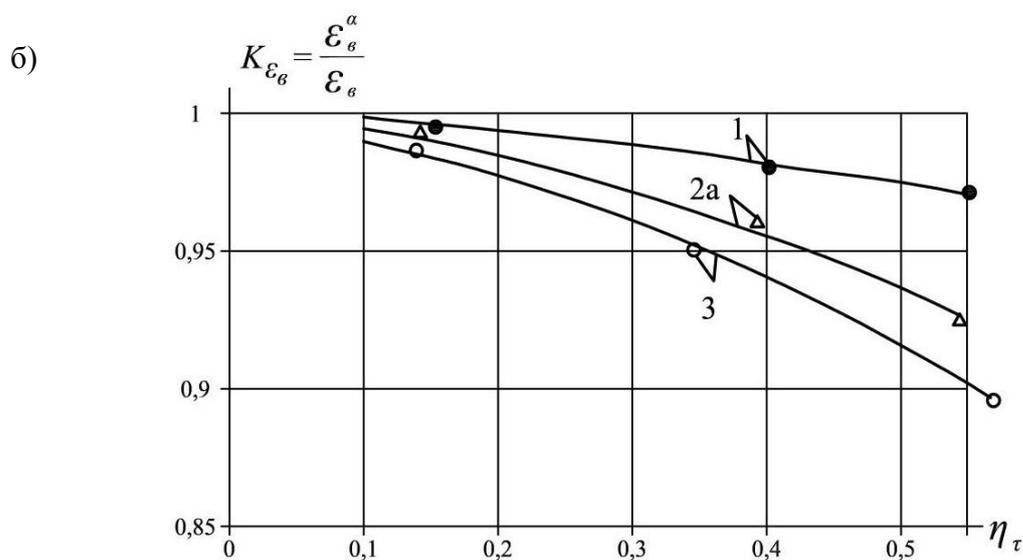
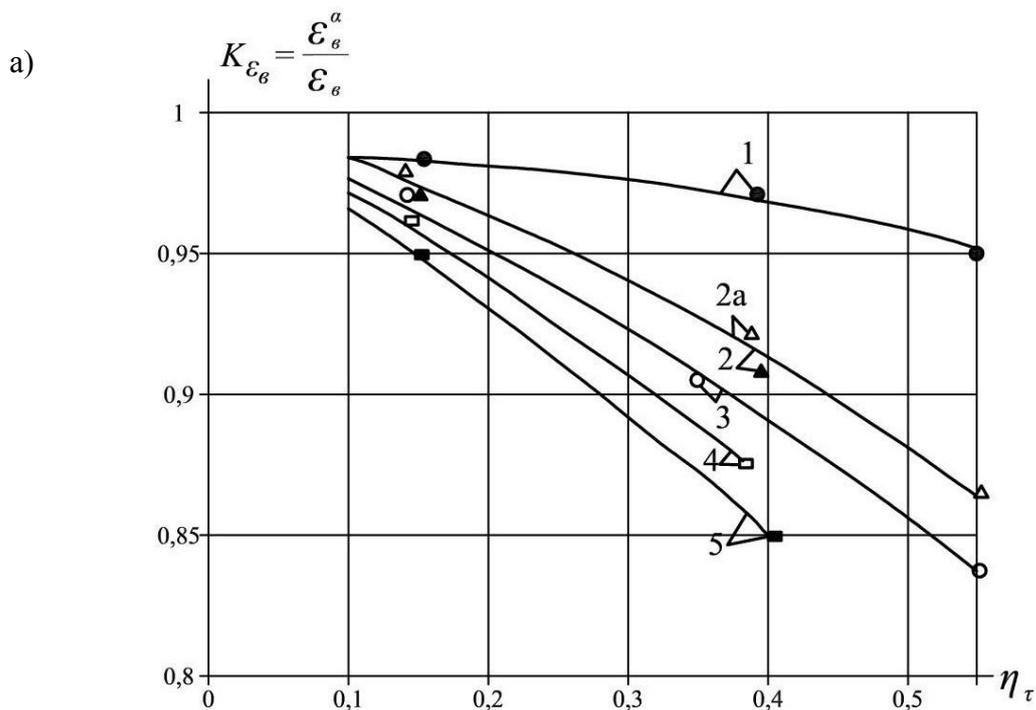


Рис. 6 – Изменение предельной сжимаемости бетона, вызванное предварительным обжатием:

а - при $t-\tau = 70$ сут.; б - при $t-\tau = 8$ сут. Точки и кривые - по опытным данным;

1- $\tau = 50$ сут.; R=80 МПа;

2- $\tau = 14$ сут.; R=80 МПа;

2а- $\tau = 14$ сут.; R=90 МПа;

3- $\tau = 12$ сут.; R=90 МПа;

4- $\tau = 10$ сут.; R=80 МПа;

5- $\tau = 7$ сут.; R=80 МПа.

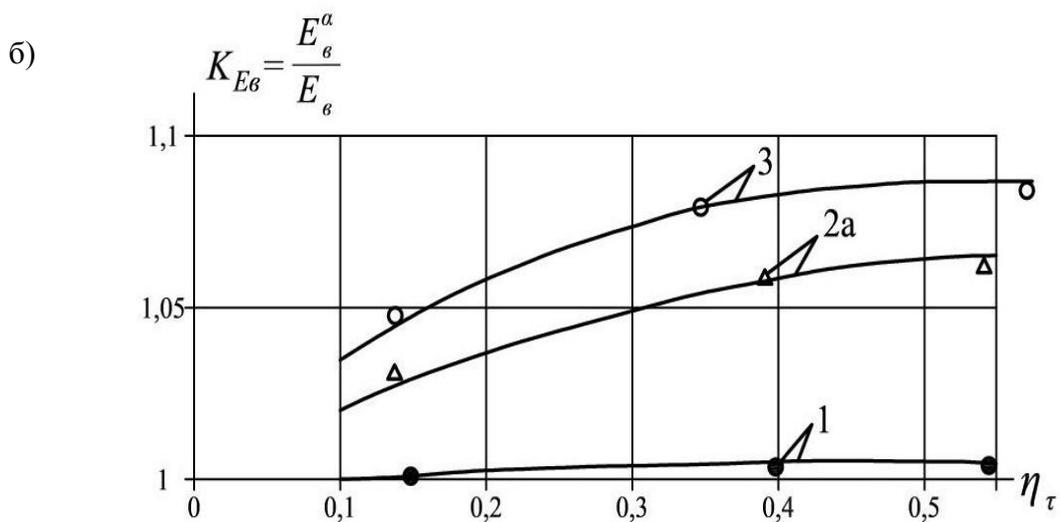
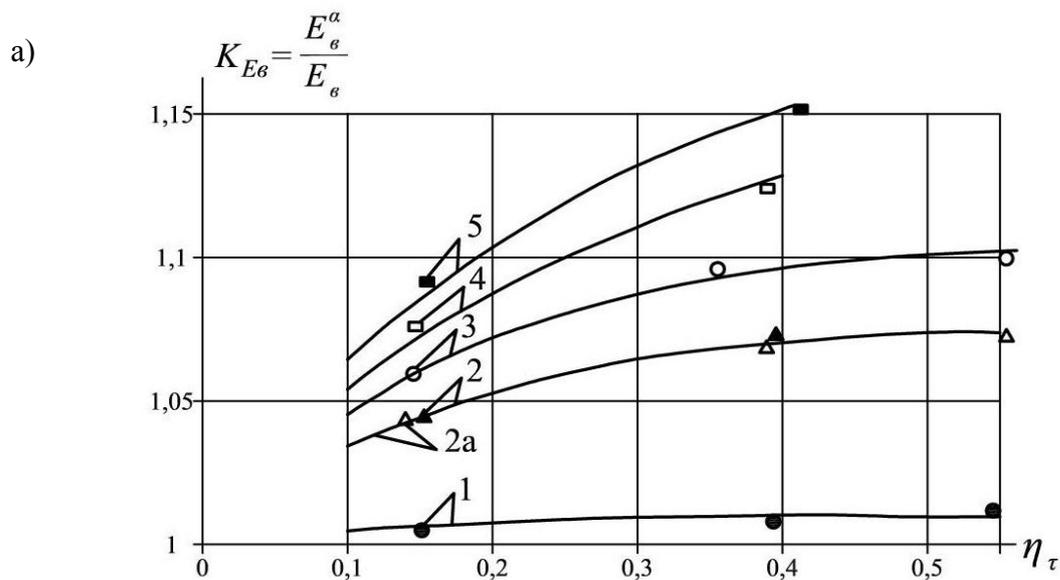


Рис. 7 – Изменение модуля упругости бетона при сжатии, вызванное предварительным обжатием:

а - при $t-\tau = 70$ сут.; б - при $t-\tau = 8$ сут. Точки и кривые - по опытным данным;

1- $\tau=50$ сут.; $R=80$ МПа;

2- $\tau=14$ сут.; $R=80$ МПа;

2а - $\tau=14$ сут.; $R=90$ МПа;

3- $\tau=12$ сут.; $R=90$ МПа;

4- $\tau=10$ сут.; $R=80$ МПа;

5- $\tau=7$ сут.; $R=80$ МПа.

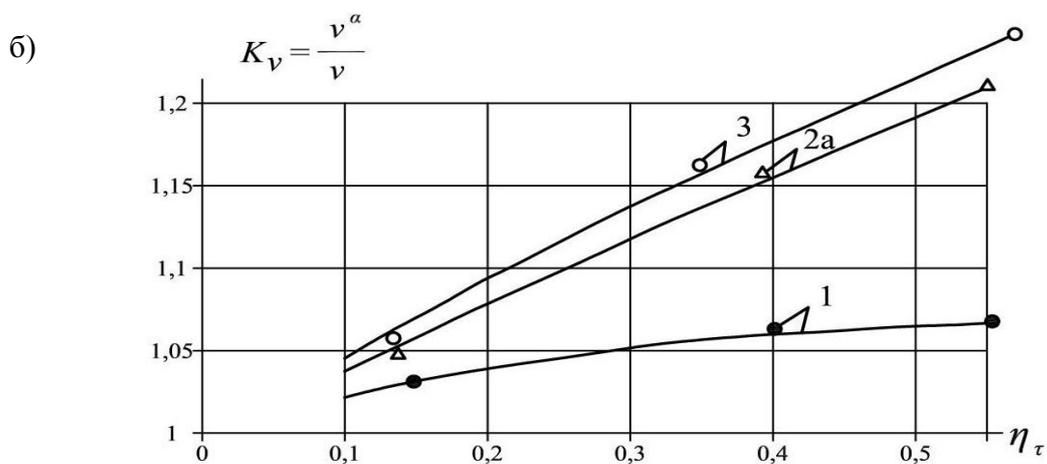
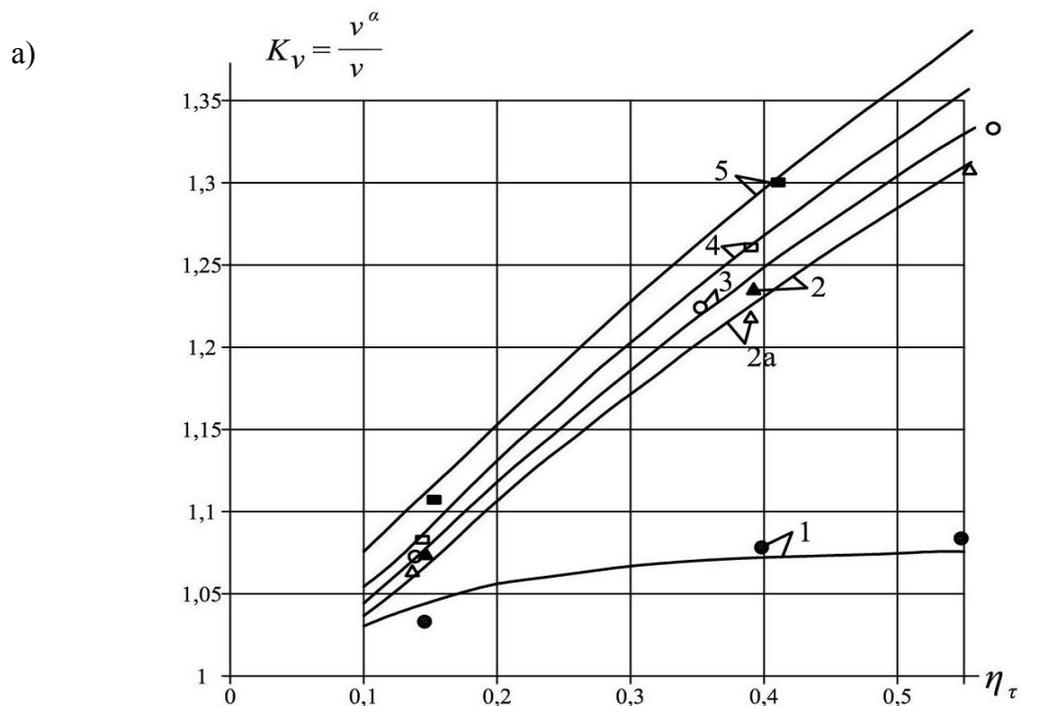


Рис. 8 – Изменение коэффициента упругости бетона при сжатии, вызванное предварительным обжатием:
 а - при $t-\tau = 70$ сут.; кривые - по формуле 4, точки - по опытным данным;
 б - при $t-\tau = 8$ сут.; точки и кривые - по опытным данным;

1- $\tau=50$ сут.;	R=80 МПа;
2- $\tau=14$ сут.;	R=80 МПа;
2а- $\tau=14$ сут.;	R=90 МПа;
3- $\tau=12$ сут.;	R=90 МПа;
4- $\tau=10$ сут.;	R=80 МПа;
5- $\tau=7$ сут.;	R=80 МПа.

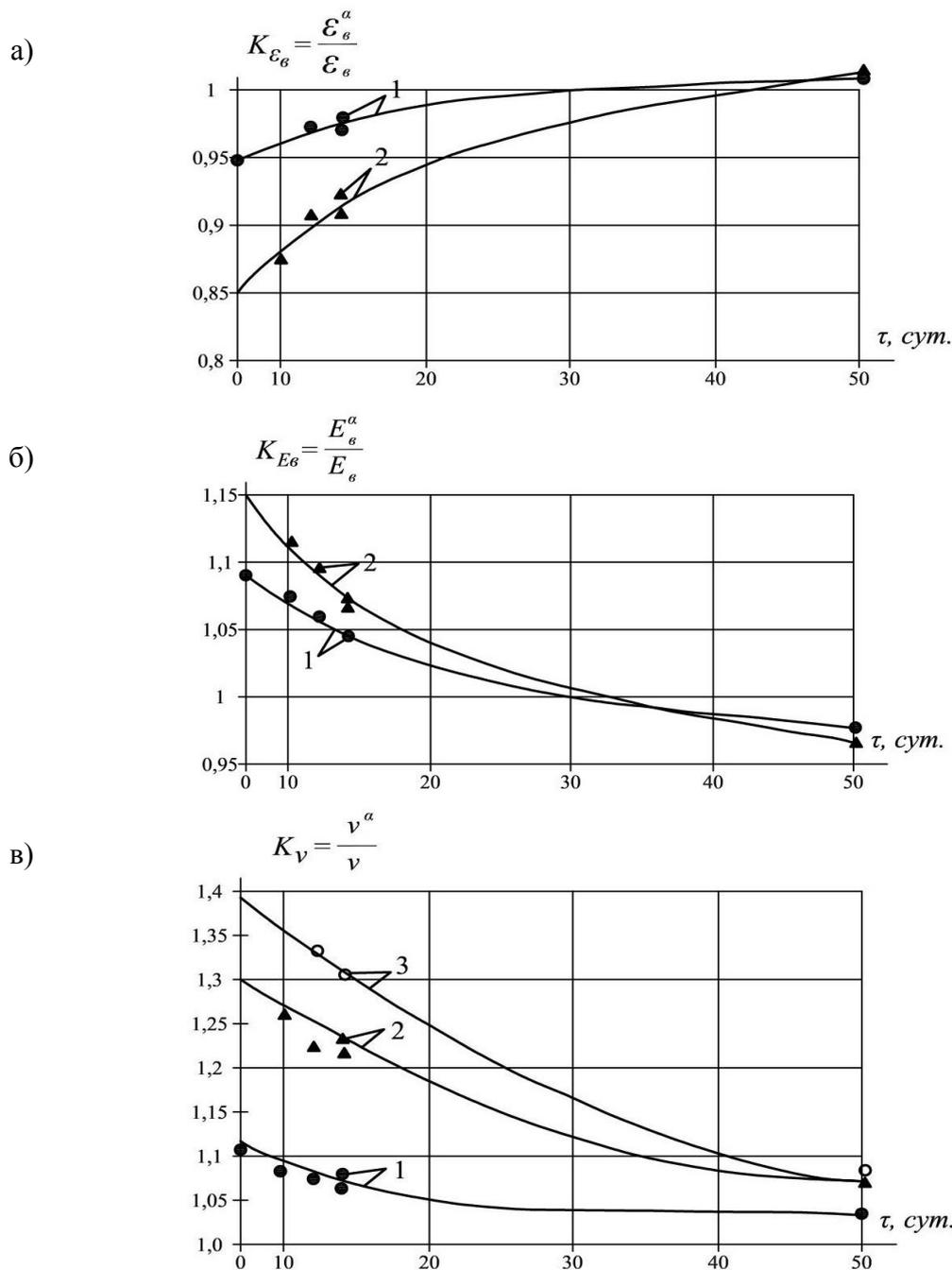


Рис. 9 – Влияние возраста бетона при обжати τ на изменение его:

а - предельной сжимаемости;

б - модуля упругости при сжатии. Точки и кривые - по опытным данным;

в - коэффициента упругости при сжатии.

Кривые - по формуле 4, точки по опытным данным: 1 - при $\eta = 0,15$; 2 - при $\eta = 0,4$; 3 - при $\eta = 0,55$.

Литература:

1. Маилян Д.Р. Метод расчета сжатых железобетонных элементов с учетом трансформированных диаграмм деформирования бетона при различных воздействиях: монография / Маилян Д.Р., Ахмед Аббуд, Ганди Джахажах. - 2008. - 67 с.

2. Хунагов Р.А. Расчет двухслойных предварительно напряженных железобетонных панелей /

Хунагов Р.А., Маилян Д.Р. // Вестник Майкопского государственного технологического университета.- 2011. - Вып. 4. - С. 33-36.

References:

1. *Mailyan D.R., Ahmad Abboud, Gandhi Dzhahazhah. Calculation method of compressed concrete elements, with the transformed strain diagram of concrete under different treatments: monograph. 2008. 67 p.*
2. *Khunagov R.A., Mailyan D.R. Calculation of two-layer pre-stressed concrete panels // Bulletin of Maikop State Technological University. 2011. №4. P. 24-29.*