

УДК 693.54
ББК 38.33
О-75

Мкртчян Аксель Мгерович, аспирант кафедры железобетонных и каменных конструкций ФГБОУ ВПО «Ростовский государственный строительный университет», тел.: 8(961) 3273232, e-mail: aksel555@engineer.com;

Аксенов Владимир Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций ФГБОУ ВПО «Ростовский государственный строительный университет», тел.: 8(918) 5004361, e-mail: aksenov.v.n@mail.ru;

Маилян Дмитрий Рафаэлович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой железобетонных и каменных конструкций ФГБОУ ВПО «Ростовский государственный строительный университет», тел.: 8(863) 2019031;

Блягоз Алик Моссович, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных и общепрофессиональных дисциплин ФГБОУ ВПО «Майкопский государственный технологический университет», e-mail: alfa-maikop@yandex.ru;

Сморгунова Марина Васильевна, старший преподаватель кафедры строительных и общепрофессиональных дисциплин ФГБОУ ВПО «Майкопский государственный технологический университет».

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКТИВНЫХ СВОЙСТВ ВЫСОКОПРОЧНЫХ БЕТОНОВ

(рецензирована)

В статье приводятся результаты выполненного авторами экспериментального исследования конструктивных свойств высокопрочных бетонов. Так, указаны основные прочностные и деформационные характеристики полученных бетонов классов В70...В110. Проведен анализ скорости твердения бетона, соотношения призмной и кубиковой прочности. Предложена новая зависимость для аналитического описания диаграммы деформирования « σ_b - ϵ_b » для высокопрочных бетонов, хорошо согласующаяся с экспериментальными данными.

Ключевые слова: высокопрочный бетон, физический эксперимент, характеристики бетона, коэффициент призмной прочности, скорость твердения бетона, диаграмма состояния бетона, зависимость напряжения-деформации в бетоне, предельные относительные деформации бетона.

Mkrтчyan Axel Mgerovich, post graduate student of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Rostov State University of Civil Engineering, tel.: 8-961-327-32-32, e-mail: aksel555@engineer.com;

Aksenov Vladimir Nicholaevich, Candidate of Technical Sciences, assistant professor of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Rostov State University of Civil Engineering, tel.: 8-918-500-43-61, e-mail: aksenov.vn@mail.ru;

Mayilian Dmitry Rafaelovich, Doctor of Technical Sciences, professor, head of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Rostov State University of Civil Engineering, tel.: (863) 201-90-31;

Blyagoz Alec Mossovich, Candidate of Technical Sciences, assistant professor of the Department of Construction and General Professional Disciplines, Maikop State Technological University, e-mail: alfa-maikop@yandex.ru;

Smorgunova Marina Vasiljevna, senior lecture of the Department of Construction and General Professional Disciplines, Maikop State Technological University.

PECULIARITIES OF CONSTRUCTION PROPERTIES OF HIGH-STRENGTH CONCRETE

(reviewed)

The article presents the results of the experimental study of design features of high-strength concrete. The major strength and deformation characteristics of the concrete of B70 ... B110 classes have been given. The analysis of the rate of hardening of concrete, the ratio of prism and cube strength has been made. A new dependence for the analytical description of the deformation diagram « σ_b - ε_b » for high-strength concrete, which agrees well with the experimental data has been offered.

Keywords: high-strength concrete, physical experiment, characteristics of concrete, the coefficient of prismatic strength, speed of concrete hardening, diagram of the concrete condition, stress-strain relationship of concrete, marginal relative deformations of the concrete.

Интенсивность развития высотного строительства ставит перед учеными новые задачи получения бетонов с повышенными прочностными свойствами. Использование таких бетонов приводит к сокращению размеров поперечных сечений, увеличению полезных площадей, снижению трудоемкости и стоимостью строительства. Вместе с тем внедрение высокопрочных бетонов осуществляется с осторожностью, так как их конструктивные свойства изучены далеко не в полной мере.

В связи с этим специалистами Ростовского государственного строительного университета была поставлена задача изучить характеристики и свойства высокопрочных бетонов классов В70...В110, а также особенностей их работы, влияющие на прочность и деформативность железобетонных конструкций. В первой части исследований на центральное сжатие кратковременной нагрузкой были испытаны бетонные кубы с размерами грани 100 мм и 150 мм и призмы размером 100x100x400 мм и 150x150x600 мм. До момента испытания образцы хранились в климатической камере при относительной влажности воздуха 98% и температуре 20-25°C.

Для исследования были приняты составы бетонной смеси (табл. 1), обеспечивающие по расчету классы бетонов от В60 до В110. В качестве крупного заполнителя применялся базальтовый щебень ереванского месторождения фракции 5-20 мм, мелкий заполнитель – Тандзутский кварцевый песок с модулем крупности 3,1 [1, 2]. Для снижения в составе бетона количества пылевато-глинистых частиц заполнители были вымыты и высушены.

Таблица 1 - Составы высокопрочного бетона

Планируемый класс бетона	Ед. измер.	В60	В70	В80	В90	В100	В110
Цемент	кг	722	830	853	830	830	860
Щебень 5-10 мм	кг	538	443	443	443	443	443
Щебень 10-20 мм	кг	999	824	824	824	824	824
Песок	кг	308	240	210	240	240	240
Вода	л	179	179	179	166	166	165
N200	л	7,2	4,3	4,0	6,64	7,1	8,3
В/Ц		0,25	0,23	0,21	0,2	0,2	0,19
Полученный фактический класс бетона		В64	В72	В81	В87	В94	В109

В качестве вяжущего применялся бездобавочный портландцемент марки М500 производства ЗАО «Мика-Цемент» (Mika-Cement, The Armenian Republic). Для обеспечения подвижности смеси при низком водоцементном отношении, использовался суперпластификатор Marefluid N200 производства компании Marei S.p.A., Italy в количестве от 0,5 до 1,0 % от массы цемента.

Для исследования скорости набора прочности высокопрочными бетонами и сопоставления этих данных с нормативными зависимостями, были проведены испытания с образцами в возрасте 7, 14, 28, 50 суток в соответствии с требованием ГОСТ 10180-90 и ГОСТ 18105-2010. Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Таблица 2 - Кубиковая прочность бетона в различном возрасте, МПа

Класс бетона	Возраст, дни			
	7	14	28	50
B64	46	56	64	70
B72	51	62	72	77,5
B81	58	70	81	88
B87	62	75	87	95
B94	67	71	94	109
B109	77,5	94	109	120

На рис. 1 показана кинетика твердения бетонов различных классов, описанная стандартными зависимостями Российских норм (1) и рекомендаций европейского комитета по железобетону [3] (далее ЕКБ-ФИП) (2):

$$R_t = R_{28} \cdot \sqrt[3]{t/28} = 0,691 \cdot R_{28} \cdot \sqrt[3]{t}, t > 3; \quad (1)$$

$$R_t = R_{28} \cdot \exp\left(k \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right)\right), t > 1; \quad (2)$$

где R_t – кубиковая прочность бетона в возрасте t , суток; R_{28} – то же в возрасте 28 суток.

Значение коэффициента k в формуле (2) определяет скорость набора прочности бетона. Для исследуемых бетонов k было определено путем подбора значения до максимального совпадения результатов вычислений по формуле (2) и данных эксперимента. Значения коэффициента k , полученные подбором, приведены во втором столбце табл. 3. Графики зависимости $R(t)$ полученные по формулам (1) и (2) приведены на рис. 1.

Таблица 3 - Значения коэффициента k для формулы (2)

Класс бетона	k экспериментальное	k по формуле (3)
64	0,3210	0,3209
72	0,3249	0,3254
81	0,3300	0,3299
87	0,3329	0,3326
94	0,3360	0,3356
109	0,3410	0,3413

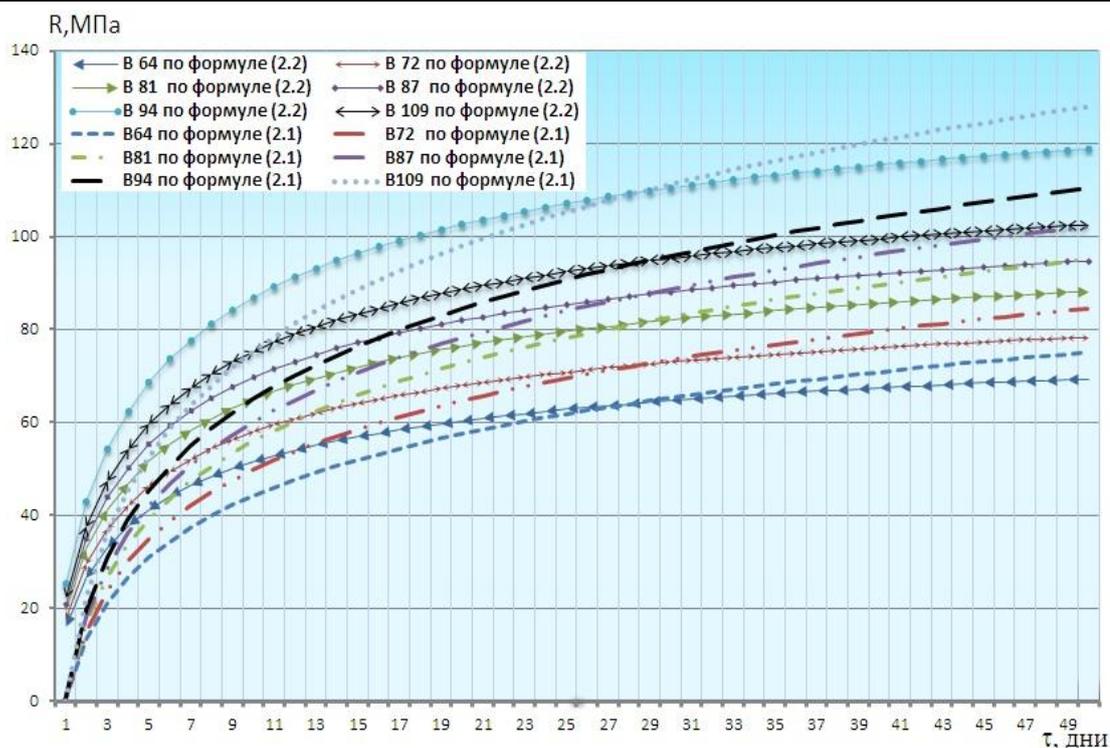


Рис. 1. Кинетика твердения высокопрочного бетона по формулам (1) и (2)

Сопоставляя экспериментальные данные с расчетными, стоит отметить, что скорость набора прочности исследуемым бетоном классов В70-В110 не соответствует логарифмической зависимости, описываемой уравнением (1), рекомендуемым в Российской литературе. Использование в формуле ЕКБ (2) коэффициентов k из табл. 3 дает полное соответствие экспериментальных и теоретических значений прочности бетона в различном возрасте.

Полученные значения величины k от 0,321 до 0,341 соответствуют медленнотвердеющим бетонам [4], что объясняется влиянием на кинетику прочности применяемого суперпластификатора – по данным производителя он оказывает легкое замедляющее действие.

Зависимость коэффициента k , приведенного в табл. 3 от класса бетона носит не линейный характер. Наиболее удобно зависимость $k(B)$ описывается следующим выражением:

$$K = 0,0382 \cdot \ln B + 0,1621, \quad (3)$$

где B – класс бетона. На рис. 2 показано сравнение значений k , полученных подбором на основе данных эксперимента, и вычисленных по формуле (3). В табл. 3 приведены численные значения k для бетонов, полученных в эксперименте. Анализ графика на рис. 2 и данных табл. 3 показывает, что формула (3) для определения коэффициента k , учитывающего скорость набора прочности бетона в формуле (2.2), дает хорошую сходимость с данными эксперимента.

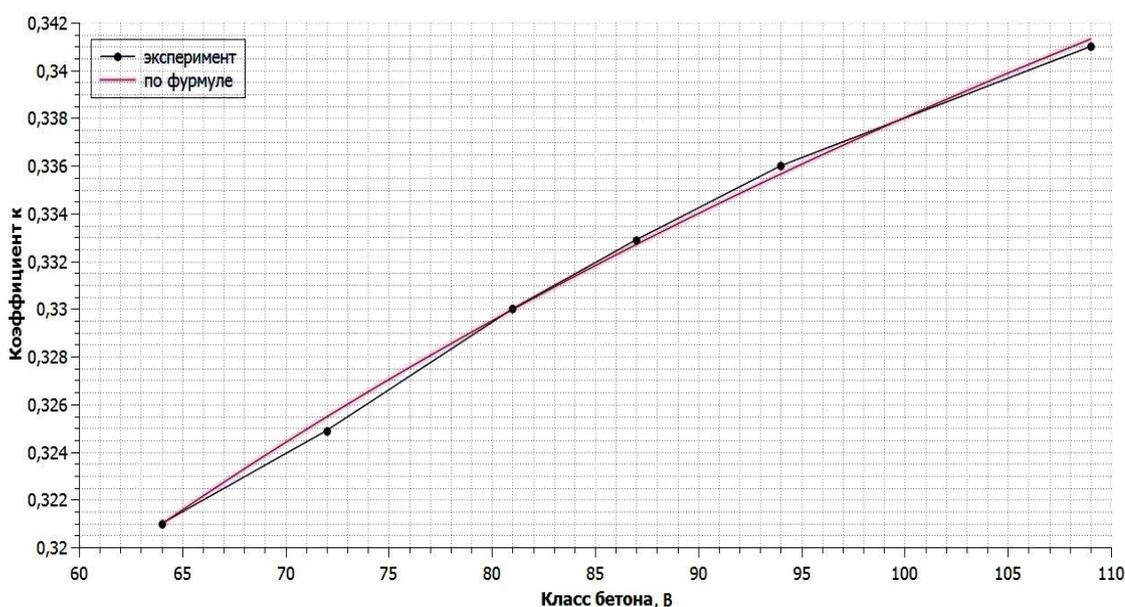


Рис. 2. Сравнение коэффициента k по формуле (3) и на основе данных эксперимента

Средняя плотность полученных бетонов колеблется от 2470 до 2680 кг/м³. Среднее значение коэффициента поперечной деформации равно $\nu_b = 0,19$. Полученные из различных смесей бетоны по результатам статистической обработки соответствуют классам по прочности на сжатие от В62 до В107. Их основные характеристики в возрасте более 28 сут. приведены в табл. 4.

Таблица 4 - Экспериментальные характеристики бетона

Класс бетона	R, МПа	R _b , МПа	R _b / R	E _b , ГПа	ε _{b0} ·10 ⁵	Δ= $\frac{R_b}{\varepsilon_{b0} E_b}$
B62	63,5	50,1	0,788	34,0	208	0,708
B70	71,4	56,1	0,786	36,3	217	0,712
B81	84,7	66,2	0,782	38,7	224	0,764
B89	93,2	72,4	0,777	39,5	226	0,811
B96	97,6	75,1	0,769	42,4	245	0,723
B107	108,4	83,7	0,772	45,7	269	0,681

Одной из задач исследования являлось получение экспериментальной зависимости призмной прочности бетона от кубиковой. На рис. 3 в графическом виде показана эта зависимость R_b = f(R) для высокопрочных бетонов различных классов. Анализ данных показал, что коэффициент призмной прочности, определяемый как отношение призмной прочности бетона, R_b, к кубиковой, R, для полученных высокопрочных бетонов не соответствует принятым в РФ и РА значениям (табл. 5). Так, зависимость R_b = f(R) не подчиняется соотношению

$$R_b = (0,77 - 0,00125 \cdot R)R. \quad (4)$$

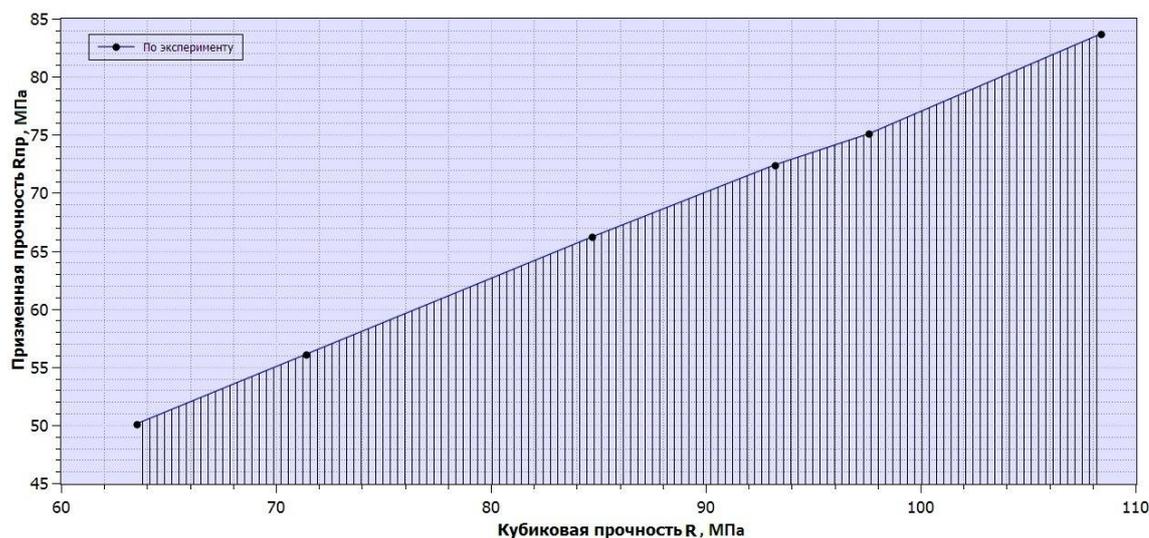


Рис. 3. Зависимость призмной прочности от кубиковой

Таблица 5 - Соотношение призмной и кубиковой прочности бетонов

Класс бетона	Отношение R _{пр} /R		Среднее отклонение экспериментальных данных от:			
			вычисленных по (4)		вычисленных по (5)	
	эксперимент	по (4)	абсолютное	относительное, %	абсолютное	относительное, %
B62	0,788	0,691	0,097	14,1	-0,0004	-0,001
B70	0,786	0,681	0,105	15,5	0,0005	0,001
B81	0,782	0,664	0,118	17,7	0,0013	0,002
B89	0,777	0,654	0,123	18,9	-0,0006	-0,001
B96	0,769	0,648	0,121	18,7	-0,0070	-0,009
B107	0,772	0,634	0,138	21,7	-0,0001	0,000

При этом экспериментальные значения коэффициента призмной прочности 0,769...0,788 (табл. 5) достаточно хорошо согласуются с предложенным О.Я. Бергом значением 0,783 для бетонов всех классов [5]. Максимальная разница составляет 1,8 % для бетона B96. Однако в эксперименте выявлена явная тенденция к снижению исследуемого коэффициента с ростом прочности бетона (рис. 2), поэтому принятие постоянного значения коэффициента призмной прочности для бетонов различных классов

проведенными экспериментами не подтверждено.

Среднее отклонение экспериментальных значений от нормативных данных по зависимости (4) в соответствии с табл. 5 составляет от 14 до 22%, причём отклонение увеличивается с ростом класса бетона. Из этого следует, что зависимость (4) не отражает особенностей высокопрочных бетонов и необходима ее корректировка. Нами предложен откорректированный вид стандартной зависимости $R_b = f(R)$ (формула 5):

$$R_b = (0,77 \cdot \beta - 0,00125R)R, \text{ при } R > 60 \text{ МПа.} \quad (5)$$

где $\beta = 1,123 + 0,00115(R - 60)$; $R \geq 60$ МПа.

Вычисленные по (5) значения призмной прочности практически совпадают с экспериментальными данными (табл. 5). На рис. 4 представлен график зависимости коэффициента призмной прочности от кубиковой прочности, $R_b/R = f(R)$, на основе данных эксперимента, а также полученный из формул (4) и (5) и по предложению О.Я. Берга. Как видно из рисунка, предложенная формула (5), в отличие от нормативной, даёт очень близкий результат с экспериментальными данными. Она учитывает снижение коэффициента призмной прочности с повышением класса бетона.

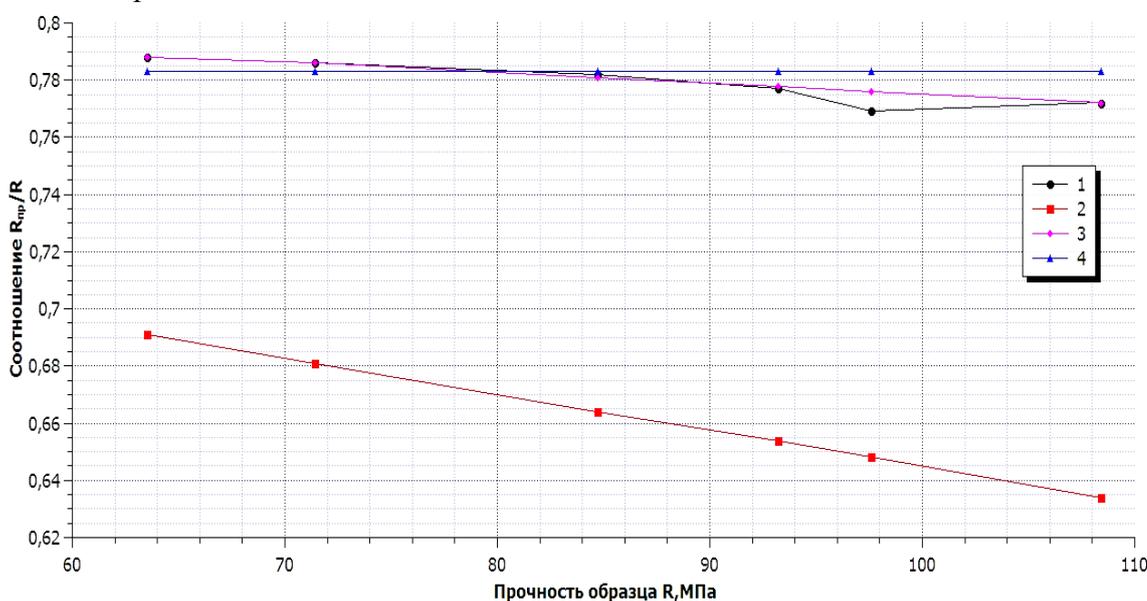


Рис. 4. Зависимость коэффициента призмной прочности от прочности образца:

1 – по данным эксперимента; 2 – по стандартной формуле (4);

3 – по предложенной авторами формуле (5); 4 – по предложению О.Я. Берга

Одной из задач исследования являлось получение экспериментальных данных, необходимых для построения диаграмм деформирования бетона в условиях центрального сжатия при кратковременном действии нагрузки с учетом нисходящей ветви. В реальных конструкциях нисходящая ветвь реализуется при работе поперечных сечений с градиентом деформаций по высоте сечения, например, во внецентренно сжатых колоннах или изгибаемых элементах. При этом дополнительные усилия, возникающие при разрушении наиболее нагруженных волокон, воспринимаются соседними, менее нагруженными, а также арматурными стержнями.

Экспериментальные диаграммы состояния бетона « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » при сжатии от действия кратковременной нагрузки приведены на рис. 3. Деформации сжатия здесь и далее условно приняты положительными.

На представленных графиках следует заметить, что максимальная относительная деформация, ε_{b0} , соответствующая напряжению R_b , увеличивается с ростом прочности бетона. Несложно убедиться, что для исследуемых высокопрочных бетонов В70-В110 эта зависимость носит почти линейный характер. Для ее описания предлагается следующая формула:

$$\varepsilon_{b0} = (1,62 R_b + 127,33) \cdot 10^{-5}. \quad (6)$$

Здесь R_b следует подставлять в МПа.

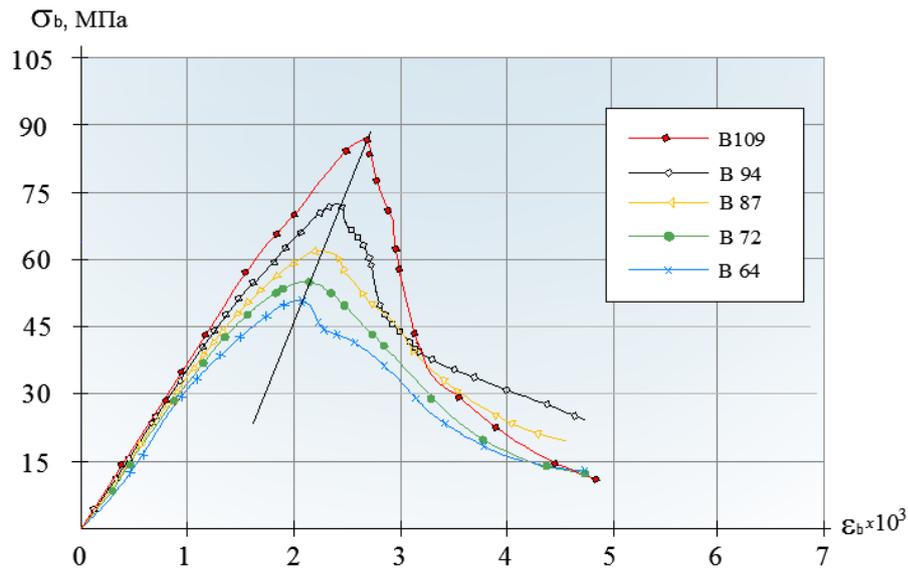


Рис. 5. Экспериментальные диаграммы « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » для высокопрочных бетонов

Вопросам аналитического описания диаграмм деформирования бетонов посвящено большое количество исследовательских работ как в нашей стране, так и за рубежом [6-9]. Исследователи предлагают новые зависимости или корректируют известные ранее. Из множества предложений в качестве основной диаграммы ЕКБ-ФИП назвал зависимость Сарджина [3], включенную также в европейские нормативные документы [10]. Зависимость имеет вид:

$$\frac{\sigma_b}{R_b} = \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k-2)\eta}, \quad (7)$$

$$\text{где } \beta = \varepsilon_b / \varepsilon_{b0}, \quad k = \frac{1,1 \cdot E_b \cdot |\varepsilon_{b0}|}{R_b}.$$

Ее применимость для бетонов средней прочности (В15...В60) подтверждена многочисленными опытами.

Данная зависимость хорошо описывает работу бетонов средней прочности, однако для высокопрочных бетонов она не подходит: построение диаграмм на основе (7) для исследуемых бетонов классов В70-В110 показало значительные расхождения теоретических кривых с данными эксперимента как в восходящей части диаграммы, так и в нисходящей (рис. 4).

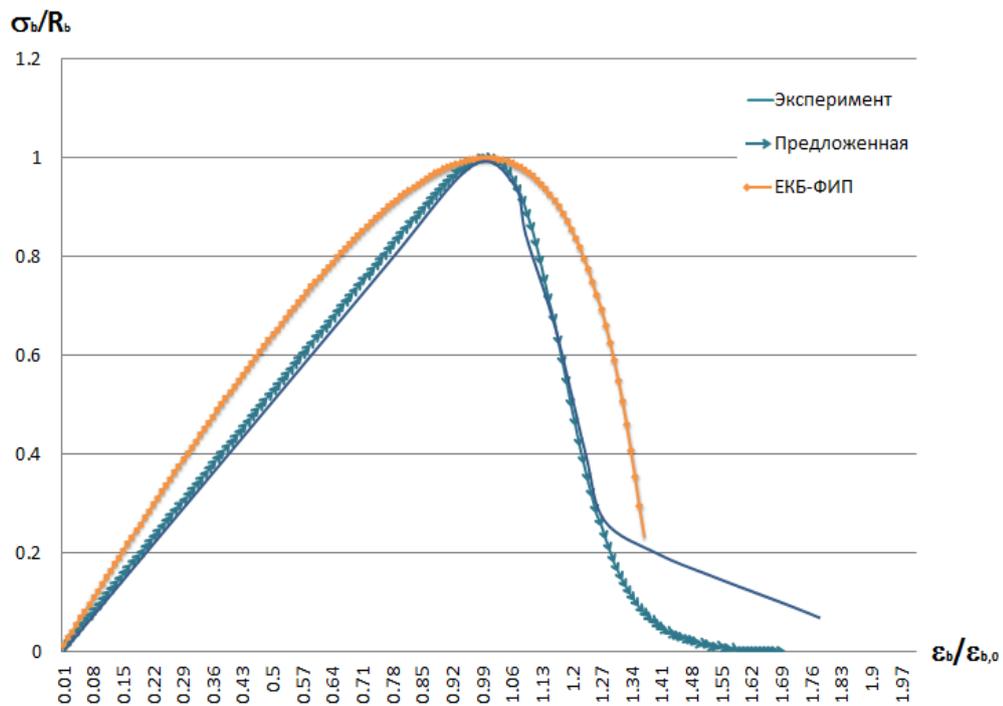


Рис. 6. Диаграммы состояния бетона:
экспериментальная, по предложенной формуле (8) и по формуле ЕКБ-ФИП (7)

Для более точного описания работы высокопрочных бетонов предлагается к использованию откорректированная авторами зависимость на основе формулы Сарджина, дающая хорошую сходимость с диаграммами, полученными по результатам эксперимента:

$$\frac{\sigma_b}{R_b} = \frac{r\eta - \eta^2}{r - 1 - \eta^2 + \eta^r}, \quad (8)$$

где $\eta = \varepsilon_b/\varepsilon_{b0}$, $r = (\Delta - 0,5)R$, R – прочность бетонного образца, Δ – коэффициент упругости в вершине диаграммы, определяемый по формуле

$$\Delta = \frac{E_0}{E_b}$$

или

$$\Delta = \frac{R_b}{\varepsilon_{b0}E_b},$$

где E_0 – модуль деформации бетона в вершине диаграммы, соответствующий тангенсу угла, α_0 , наклона секущей к кривой $\sigma_b - \varepsilon_b$ в точке с относительными деформациями $\varepsilon_b = \varepsilon_{b0}$ (рис. 5). Графически $E_0 = R_b/\varepsilon_{b0}$, E_b – начальный модуль упругости бетона, ε_{b0} рекомендуется определять по предложенной формуле (6).

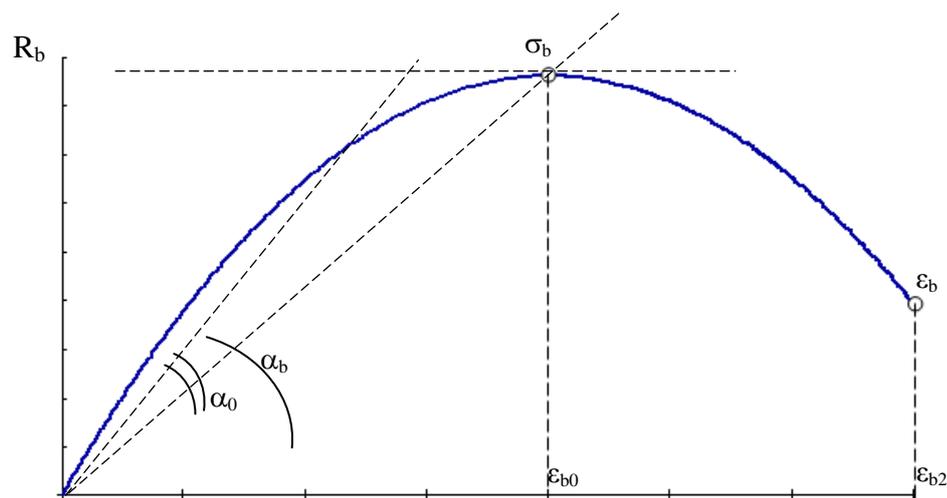


Рис. 7. К определению E_0

График зависимости (8) построен на рис. 4. Из сопоставления кривых на указанном рисунке видно, что предлагаемая зависимость практически полностью совпадает с экспериментальной кривой в восходящей части, а также в нисходящей части до напряжений $\sigma_b \approx 0,3R_b$.

Литература:

1. Ацагорцян З.А. Природные каменные материалы Армении. М.: Стройиздат, 1967. 470 с.
2. Материаловедение для строителей (руководство) / П.А.Тер-Петросян [и др.]. Ереван: Наири, 2005. 616 с.
3. Comite Euro-International du beton. CEB-FIP model code (Design code). Paris: Thomas Telford, 1990. 437 p.
4. Несветаев Г.В. Бетоны: учеб. пособие. Ростов н/Д: Феникс, 2011. 381 с.
5. Берг О.Я., Щербаков Е.Н., Писанко Г.Н. Высокопрочный бетон. М.: Стройиздат, 1971. 207 с.
6. Кургин К.В., Маилян Д.Р. О необходимости трансформации базовой аналитической зависимости « σ_b – ϵ_b » бетона [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона. 2011. №4. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4y2011/712> (дата обращения: 20.07.2013).
7. Исследование работы сжатых железобетонных элементов из высоко-прочного бетона / В.Н. Аксенов [и др.] // Новые технологии. 2012. Вып. 4. С. 32-35.
8. Metin Husem, Selim Pul. Investigation of stress–strain models for confined high strength concrete // Sadhana. 2007. Vol. 32, Part 3. P. 243-252.
9. Cusson D., Paultre P. Stress-strain model for confined high-strength concrete // J. Struct. Eng. 1995. Vol. 121. P. 468-477.
10. EN 1992 Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1: General rules and rules for buildings. Brussels: European Committee for Standardization, 2001. 52 p.

References:

1. Atsagortsyan Z.A. Natural stone materials of Armenia. M.: Stroyizdat, 1967. 470 p.
2. Materials Science for Engineers (manual) / P.A.Ter –Petrosyan [and oth.]. Yerevan: Nairi, 2005. 616 p.
3. Comite Euro-International du beton. CEB-FIP model code (Design code). Paris: Thomas Telford, 1990. 437 p.
4. Nesvetaev G.V. Concrete: a training manual. Rostov n / D: Phoenix, 2011. 381 p.

5. Berg O. J., E.H. Shcherbakov, G.N. Pisanko. *High-strength concrete*. M.: Stroyizdat, 1971. 207 p.
6. Kurgin K.V., Mayilian D.R. *On the need for transformation of the basic analytical correlation « σ_b – ε_b » of concrete* // *Journal of Engineering of Don*. 2011. №4 . URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4y2011/712> (date accessed 20/07/2013).
7. *The study of compressed concrete elements of high-strength concrete* / V.N. Aksenov // *New Technologies*, 2012. №4. P. 32 -35.
8. Metin Husem, Selim Pul. *Investigation of stress–strain models for confined high strength concrete* // *Sadhana*. 2007. Vol. 32, Part 3. P. 243-252.
9. Cusson D., Paultre P. *Stress–strain model for confined high-strength concrete* // *J. Struct. Eng.* 1995. Vol. 121. P. 468-477.
10. *EN 1992 Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1: General rules and rules for buildings*. Brussels: European Committee for Standardization, 2001. 52 p.