

9. Poljakov V.V., Skvorcov L.S. *Nasosy i ventilatory: ucheb. dlja vuzov* [Pumps and fans: studies. for higher education institutions]. M.: Strojizdat, 1990. 336 p.

10. Karadzhi V.G., Moskovko Ju.G. *Nekotorye osobennosti jeffektivnogo ispol'zovanija ventilacionno-otopitel'nogo oborudovanija. Rukovodstvo* [Some features of effective use of the ventilating and heating equipment. Management]. Moscow, INNOVENT, 2004. 139 p.

11. Cherkasskij V.M. *Nasosy, ventilatory, kompressory: ucheb. dlja teploenergeticheskikh vuzov* [Pumps, fans, compressors: studies. for heat power higher education institutions]. Moscow, Jenergoatomizdat, 1984. 416 p.

12. Krivoshein A.D., Andreev I.V. *Issledovanie processov raspredelenija vozduha v gibridnyh* [Research of processes of distribution of air in hybrid systems of ventilation of residential buildings]. *Vestnik SibADI*, 2013, no 5 (33). pp. 63–69.

Кривошеин Михаил Александрович (Омск, Россия) – аспирант каф. «Теплоэнергетика» Омского государственного технического университета (ОмГТУ) (644050, г. Омск, пр. Мира, 11, e-mail: 22kma@mail.ru).

Галдин Владимир Дмитриевич (Омск, Россия) – доктор технических наук, профессор каф. «Теплоэнергетика» Омского государственного технического университета (ОмГТУ) (644050, г. Омск, пр. Мира, 11, e-mail: galdin_vd@mail.ru).

Mikhail A. Krivoshein (Russian Federation, Omsk) – graduate student Omsk state technical university (644050, Omsk, Mira Ave., 11, e-mail: 22kma@mail.ru).

Vladimir D. Galdin (Russian Federation, Omsk) – doctor of technical science, professor Omsk state technical university (644050, Omsk, Mira Ave., 11 e-mail: galdin_vd@mail.ru).

УДК 620.17

СИСТЕМНАЯ МОДЕЛЬ КОЭФФИЦИЕНТА ПРИЗМЕННОЙ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА

Ю.В. Краснощёков

ФГБОУ ВО «СибАДИ», Россия, г. Омск.

Аннотация. В статье приведены результаты исследования прочности бетона в конструкциях с использованием системного подхода. Показано, что существующая модель призмной прочности с эмпирической зависимостью от класса бетона не учитывает влияния изменчивости прочности бетона. Разработана вероятностная модель коэффициента призмной прочности с учетом его зависимости от однородности бетона. Реализация этой модели является стимулом повышения качества бетона в конструкциях.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, прочность бетона, призмная прочность, коэффициент призмной прочности, расчетная модель, системный подход.

Введение

Известно, что прочность бетона зависит от многих факторов. Фактическая прочность бетона в железобетонных конструкциях может существенно отличаться от принятой при проектировании призмной прочности. Существующая модель призмной прочности с эмпирической зависимостью от класса бетона не учитывает влияния изменчивости прочности бетона. Опытных данных бывает совершенно недостаточно для оценки характеристик прочности как случайной величины, а, следовательно, для вероятностных расчетов. Серьезным препятствием для перехода к вероятностным методам проектирования железобетонных конструкций является отсутствие теоретической модели в виде зависимости прочности бетона в конструкции и опытных образцах с учетом изменчивости прочностных

свойств (однородности). В данной работе предлагается вероятностная модель коэффициента призмной прочности, разработанная с применением системного подхода.

Модели прочности бетона

Основным показателем прочности на сжатие является класс бетона B (нормативная кубиковая прочность R_n в МПа), который соответствует прочности стандартных кубов с обеспеченностью 0,95 и однородностью, характеризуемой обычно коэффициентом вариации прочности $v_b = 0,135$ [1].

В расчетах конструкций по предельным состояниям сопротивление бетона сжатию принимается в виде призмной прочности R_{bn} или R_b в зависимости от группы предельных состояний. Для перехода от нормативной прочности кубов к нормативной

прочности призм служит, так называемый, нормативный коэффициент призмной прочности $k_{bn} = R_{bn}/R_n$, который может быть определен из эмпирической формулы

$$R_{bn} = B(0,77 - 0,00125B) > 0,72B. \quad (1)$$

Таблица 1 – Нормативные значения призмной прочности

Источник	Нормативные значения призмной прочности при классе бетона, МПа										
	B10	B15	B20	B25	B30	B35	B40	B45	B50	B55	B60
(1)	7,57	11,2	14,9	18,5	22,0	25,4	28,8	32,1	36,2	38,5	41,7
[4]	7,5	11,0	15,0	18,5	22,0	25,5	29,0	32,0	36,0	39,5	43,0

Для высокопрочных бетонов B55 и B60 вступает в силу ограничение формулы (1), о котором иногда забывают, в результате чего принимают ошибочные решения [3].

Для получения среднего значения призмной прочности, необходимого при вероятностных расчетах, обычно обращаются к зависимости $R_{bn} = R_b(1 - 1,64v)$. Класс бетона или нормативная кубиковая прочность также связана со средним значением кубиковой прочности аналогичной зависимостью $R_n = R(1 - 1,64v)$.

Из сопоставления этих зависимостей можно сделать два вывода: либо нормативное и среднее значения коэффициента призмной прочности равны, либо коэффициенты вариации прочности бетона в кубах и призмах различны. Требуется выход из этой неопределенности.

В настоящее время контролируется только класс бетона, коэффициент призмной прочности в нормативных документах не упоминается. Согласно своду правил [4] расчетные и нормативные характеристики бетона определяют по таблицам СП [2] в зависимости от условного класса бетона по прочности на сжатие. Значение условного класса бетона по прочности на сжатие определяют по формуле $B = 0,8R$, где R – средняя кубиковая прочность, полученная по результатам испытаний неразрушающими методами или испытанием отобранных из конструкций образцов бетона. При больших объемах работ по оценке прочности бетона рекомендуется применять статистические методы оценки.

Форму, вид, размеры образцов, методы их испытания и расчёта регламентируют ГОСТ [2,5]. Применение призм для испытания по прочности на сжатие в этих стандартах не предусмотрено.

По формуле (1) вычислены нормативные значения сопротивления бетона осевому сжатию в зависимости от класса бетона. В таблице 1 приведены некоторые результаты, полученные расчетом по формуле (1) и округленные до 0,5 МПа нормативные значения [2].

До 1976 г. показателем прочности на сжатие принимали марку бетона M , соответствующую средней прочности стандартных кубов R в кгс/см², а нормативное значение призмной прочности получали в зависимости от марки умножением на коэффициент $k_b = 0,7 - 0,8$. Проф. Гвоздев А.А. отмечал, что в отношении величины k_b , которую, казалось бы, нетрудно определить, нет достаточной ясности [6].

В нормах 1976 г. была принята эмпирическая формула для нормативной призмной прочности

$$R_{bn} = R_n(0,77 - 0,0001R) > 0,72R_n, \quad (2)$$

согласно которой для наиболее слабых бетонов $k_{bn} = 0,77$ (вместо $k_b = 0,8$), а с увеличением прочности бетона до проектной марки $M500$ он снижался до 0,72 и далее оставался постоянным.

Следует отметить, что формула (1) является результатом незначительных преобразований (2), вызванных в основном изменением единиц измерения.

В действительности разброс опытных значений коэффициента призмной прочности достаточно велик: от 0,6 и до 0,9. Большой разброс обычно объясняют несовершенством испытаний кубов и особенно неопределенностью условий трения на поверхностях, подвергаемых действию испытательной нагрузки. По данным Гвоздева А.А., «даже в пределах отдельных групп исследований коэффициент вариации v_k значений коэффициента призмной прочности редко опускается ниже 10%, а иногда составляет и 15%». По его мнению, нормативную призмную прочность следовало бы вычислять по формуле

$$R_{bn} = R\bar{k}_b \left(1 - 1,64\sqrt{v^2 + v_k^2} \right), \quad (3)$$

где $\bar{k}_b$ – среднее значение коэффициента призмной прочности, v и v_k –

коэффициенты вариации прочности бетона кубов и коэффициента призмной прочности.

Поскольку нормативная кубиковая прочность определяется по формуле $R_n = R(1 - 1,64v)$, то для перехода от неё к нормативной призмной прочности Гвоздев А.А. использовал значение k_{bn} в виде отношения

$$k_{bn} = K_b \left(1 - 1,64 \sqrt{v^2 + v_k^2} \right) / (1 - 1,64v). \quad (4)$$

При $v = 0,135$ и $v_k = 0,1$ им получено $k_{bn} = 0,92 K_b$. Средние опытные значения коэффициента призмной прочности K_b равны примерно 0,78 для высоких марок и 0,83 для низких марок тяжелых бетонов. По Гвоздеву А.А. эмпирическая формула (2) получена из анализа опытных данных с использованием вероятностной зависимости (3).

В работе [7] опытный образец бетона в виде призмы принимается как конструктивная система с последовательно соединёнными кубами (рис. 1) [7]. Количество элементарных кубов в такой системе численно равно значению гибкости призмы, т.е. $n = \lambda = h/a$.

Так как системный подход ориентирует на операции со случайными величинами, то и системная модель прочности бетонной

призмы относится к типу вероятностных. Идея системной модели призматических образцов бетона проверена сравнением данных, полученных из анализа норм разных стран [8], с расчетными значениями, вычисленными при коэффициенте вариации $v = 0,25$, характерном для больших стройплощадок с привозным бетоном и нормальным контролем или для малых стройплощадок с изготовлением бетона на месте [9]. Эти данные приведены в таблице 2.

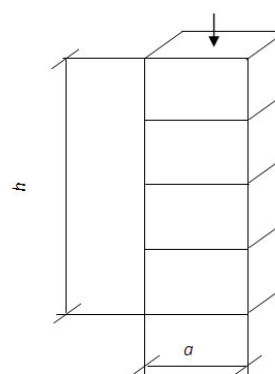


Рис. 1. Системная модель призматического образца

Таблица 2 – Усредненные значения коэффициента K_b

Источник	Гибкость призмных образцов $\lambda = n$					
	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0
[8]	1,39	1,0	0,9	0,85	0,8	0,75
(5)	-	-	-	0,86	0,79	0,74

Расчетные значения вычислены по формулам А.Р. Ржаницына, полученным им при решении задачи о распределении минимумов нескольких случайных величин применительно к системам с последовательным соединением элементов, при котором разрушение происходит по наиболее слабому из них [10].

Формулы А.Р. Ржаницына преобразованы в вид, удобный для анализа среднего коэффициента призмной прочности

$$K_b = R_b / R: K_b = 1 - tv, \quad (5)$$

где $t = 0,5642$ при $n = 2$, $t = 0,8463$ при $n = 3$ и $t = 1,0291$ при $n = 4$.

Следует отметить, что для оценки параметров случайных величин, распределенных по нормальному закону, в условиях неопределенности их изменчивости рекомендуется применять распределение

Стьюдента [11]. Поэтому прочность призмной системы в вероятностной модели примем равной граничному значению доверительного интервала, тождественному минимальной прочности кубического элемента R

$$R_b = R_1 (1 - t_{n-1} v / \sqrt{n}) = R_1 K_b, \quad (6)$$

где t_{n-1} – коэффициент Стьюдента, учитывающий ошибку, допускаемую при оценке ограниченного числа испытаний n (числа кубических элементов) по сравнению с $n = \infty$; v – коэффициент вариации прочности бетона (в скобках знак «минус» свидетельствует о разрушении системы с менее прочного элемента).

Средние значения коэффициента призмной прочности $K_b = 1 - t_{n-1} v / \sqrt{n}$ определены при значениях t_{n-1} , взятых из

табулированных таблиц t -распределения для односторонней оценки средних значений с доверительной вероятностью 0,95, приведены в таблице 3. При вычислении отношения $k_{bn}/\bar{K}_b$ по формуле (4) по предложению А.А. Гвоздева принято $v_k = 0,1$.

В результате расчёта для стандартных призм с гибкостью $\lambda = 4$ получены значения $\bar{K}_b = 1 - 1,175v = 0,71... 0,94$. Теперь можно

объяснить большой разброс этих значений неоднородностью свойств бетона, которая характеризуется коэффициентом вариации v .

Отметим, что опытным значениям $\bar{K}_b = 0,78 - 0,83$, приведенным А.А.Гвоздевым, и расчетным значениям, определенным по формуле (1) $k_{bn} = 0,72 - 0,77$ соответствует коэффициент вариации прочности бетона $v = 0,135 - 0,2$.

Таблица 3 – Коэффициенты $\bar{K}_b$ и k_{bn}

Параметры	Коэффициент вариации v					
	0,05	0,1	0,135	0,15	0,2	0,25
$k_{bn}/\bar{K}_b$ (4)	0,89	0,92	0,93	0,93	0,94	0,95
$\bar{K}_b$ (6)	0,94	0,88	0,84	0,82	0,77	0,71
k_{bn}	0,84	0,81	0,78	0,76	0,73	0,67

Приведем несколько примеров применения результатов исследования по определению призмной прочности бетона.

1. Известен только проектный класс бетона В15. При коэффициенте вариации $v = 0,135$ по таблице 3 коэффициент призмной прочности $k_{bn} = 0,78$. Вычисляем $R_{bn} = k_{bn}B = 0,78 \cdot 15 = 11,7$ МПа. При традиционном решении при В15 по табл. 1 $R_{bn} = 11$ МПа.

2. При обследовании установлено среднее значение $R = 15$ МПа. При $v = 0,135$ по табл. 3 коэффициент призмной прочности $k_{bn} = 0,78$. Вычисляем $B = 15(1 - 1,64 \cdot 0,135) = 11,7$ МПа и $R_{bn} = 0,78 \cdot 11,7 = 9,1$ МПа. При традиционном решении при В11,7 по табл. 1 $R_{bn} = 8,7$ МПа.

3. При обследовании установлено среднее значение $R = 15$ МПа и $v = 0,1$. По табл. 3 коэффициент призмной прочности $k_{bn} = 0,81$. Вычисляем $B = 15(1 - 1,64 \cdot 0,1) = 12,5$ МПа и $R_{bn} = 0,81 \cdot 12,5 = 10,1$ МПа. При традиционном решении при В12,5 по табл. 1 $R_{bn} = 9,25$ МПа.

Таблица 4 – Масштабные коэффициенты

Гибкость образцов	Длина ребра кубика (диаметр основания цилиндра), мм			
	100	150	200	300
Призма $\lambda = 1$ (куб)	0,95	1,0	1,05	1,1
Призма $\lambda = 2$	1,12	1,18	1,24	1,29
Призма $\lambda = 3$	1,19	1,25	1,31	1,38
Призма $\lambda = 4$	1,27	1,33	1,4	1,47
Цилиндр $\lambda = 2$	1,16	1,2	1,24	1,28

Данные таблицы 4 свидетельствуют о том, что системные модели прочности бетона справедливы и для цилиндрических образцов. Это подтверждается близостью или совпадением значений масштабных коэффициентов для призм и цилиндров при одинаковой гибкости λ .

4. В предыдущем примере $v = 0,2$. По таблице 3 коэффициент призмной прочности $k_{bn} = 0,73$. Вычисляем $B = 15(1 - 1,64 \cdot 0,2) = 10,1$ МПа и $R_{bn} = 0,73 \cdot 10,1 = 7,4$ МПа. При традиционном решении при В10,1 по таблице 1 $R_{bn} = 7,6$ МПа.

Показательны примеры 3 и 4, сравнение результатов которых показывает, что реализация предлагаемой модели является стимулом повышения качества бетона в конструкциях. В таблице 4 приведены значения масштабных коэффициентов, умножением на которые можно перейти от призмной прочности к кубиковой в зависимости от гибкости образца.

Значения коэффициентов для кубов (при $\lambda = 1$) и цилиндров (при отношении высоты к диаметру основания $\lambda = 2$) приняты по [1], остальные данные получены делением коэффициентов при $\lambda = 1$ на средние коэффициенты призмной прочности $\bar{K}_b$, заимствованные из источника [8] и приведенные в таблице 2.

Заключение

Таким образом, применение системных моделей при анализе результатов испытаний различных образцов бетона позволяет уточнить значения переводных коэффициентов. Основная особенность системных моделей заключается в учёте зависимости прочностных параметров от

изменчивости свойств бетона, которая подтверждается опытными данными. Если известен коэффициент вариации прочности бетона, то в ряде случаев можно получить более эффективное решение по сравнению с традиционными методами.

Библиографический список

1. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. – М.: Стандартинформ, 2013. – 30 с.
2. СП 63.13330-2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. – М.: ФАУ «ФЦС», 2013. – 156 с.
3. Мкртчян, А.М. О коэффициенте призмочной прочности высокопрочных бетонов / А.М. Мкртчян, В.Н. Аксенов – Электрон. дан. // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 3.
4. СП 13-102-2003. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений. – М.: ФГУП ЦПП, 2003. – 27 с.
5. ГОСТ 24452-80. Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона. – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2005. – 12 с.
6. Новое в проектировании бетонных и железобетонных конструкций / А.А. Гвоздев, С.А. Дмитриев, Ю.П. Гуца и др.; под ред. А.А. Гвоздева. – М.: Стройиздат, 1978. – 204 с.
7. Краснощекоев, Ю.В. Системные модели прочности бетонных образцов / Ю.В. Краснощекоев // Бетон и железобетон. – 1996. – № 5. – С. 19-21.
8. Рибицки, Р. Повреждения и дефекты строительных конструкций / Рибицки Р.; пер. с нем. К.Ф. Плитта; под ред. И.А. Физделя. – М.: Стройиздат, 1982. – 432 с.
9. Шпете, Г. Надежность несущих строительных конструкций / Г. Шпете; пер. с нем. О.О. Андреева. – М.: Стройиздат, 1994. – 288 с.
10. Ржаницын, А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность / Ржаницын А.Р. – М.: Стройиздат, 1978. – 239 с.
11. Джонсон, Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных / Н. Джонсон, Ф. Лион; под ред. Э.К. Лецкого. – М.: Изд. «Мир», 1980. – 610 с.

SYSTEM MODEL RATIO PRISM STRENGTH OF CONCRETE

Yu.V. Krasnoschekov

Abstract. The results of the research strength of the concrete in the construction using a systematic approach. It is shown that the current model of the prize-strength variable with the empirical dependence of the concrete class does not take into account the effect of the variability of the strength of concrete. A probabilistic model coefficient prism strength given its dependence on the concrete homogeneity.

Keywords: reinforced concrete structures, concrete strength, etc., of prism, prismatic coefficient of strength calculation model, a systematic approach.

References

1. GOST 10180-2012. *Betony. Metody opredelenija prochnosti po kontrol'nym obrazcam* [State standard 10180-2012. Concretes. Methods for determining the strength of the control samples]. Moscow, Standartinform, 2013. 30 p.
2. SP 63.13330-2012. [Sp 63.13330-2012. Concrete and reinforced concrete structures. The main provisions. Actualized-suite SNIP 52-01-2003 revision]. Moscow, FAU «FCS», 2013. 156 p.
3. Mkrтчjan A.M., Aksenov V.N. *O koefefficiente prizmennoj prochnosti vysokoprochnyh betonov* [On the coefficient of the prism strength of high-strength concrete]. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2013, no 3.
4. SP 13-102-2003. *Pravila obsledovanija nesushhih stroitel'nyh konstrukcij zdanij i sooruzhenij* [SP 13-102-2003. Terms examination bearing structures of buildings and structures]. Moscow, FGUP CPP, 2003. 27 p.
5. GOST 24452-80. *Betony. Metody opredelenija prizmennoj prochnosti, modulja uprugosti i koefefficienta Puassona* [State standard 24452-80. Concretes. Methods for determining the prism strength, elastic modulus and Poisson coe-cient]. Moscow, FGUP Standartinform, 2005. 12 p.
6. Gvozdev A.A., Dmitriev S.A., Gushha Ju.P. *Novoe v proektirovanii betonnyh i zhelezobetonnyh konstrukcij* [New in the design of concrete and concrete constructions]. Moscow, Strojizdat, 1978. 204 p.
7. Krasnoshekov Ju.V. *Sistemnye modeli prochnosti betonnyh obrazcov* [System model of strength of concrete samples]. *Beton i zhelezobeton*, 1996, no 5, pp. 19-21.
8. Ribicki R. *Povrezhdenija i defekty stroitel'nyh konstrukcij* [Damage and defects in building constructions]. Moscow, Strojizdat, 1982. 432 p.
9. Shpete G. *Nadezhnost' nesushhih stroitel'nyh konstrukcij* [Reliability bearing structures]. Moscow, Strojizdat, 1994. 288 p.
10. Rzhanicyn A.R. *Teorija rascheta stroitel'nyh konstrukcij na nadezhnost'* [The theory calculation of building structures on the reliability]. Moscow, Strojizdat, 1978. 239 p.
11. Dzhonson N., Lion F. *Statistika i planirovanie jeksperimenta v tehnikе i nauke. Metody obrabotki dannyh* [Statistics and experimental design in engineering and science]. Moscow, Izd. Mir, 1980. 610 p.

Краснощекоев Юрий Васильевич (Россия, г. Омск) – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Строительные конструкции», ФГБОУ ВО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: uv1942@mail.ru).

Krasnoschekov Yury Vasilyevich (Russian Federation, Omsk) – doctor of technical sciences, the associate professor, The Siberian automobile and highway academy (SibADI) (644080, Omsk, Mira Ave., 5, e-mail: uv1942@mail.ru).