

УДК 624.012.44+691.32

Н. И. КАРПЕНКО, академик РААСН, д-р техн. наук, проф.¹, В. И. КОРСУН, д-р техн. наук, проф.², С. Н. КАРПЕНКО, д-р техн. наук¹, А. М. АНУЩЕНКО, аспирант²

КРИТЕРИЙ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА ПРИ ТРЕХОСНОМ СЖАТИИ

¹ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН»

Россия, 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, д. 21. Тел.: (495) 482-40-18; эл. почта: niisf_lab9@mail.ru

²ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел.: +7 (921) 757-82-60, +7 (930) 707-74-24; эл. почта: korsun_vi@mail.ru, aleksander.anusch@yandex.ru

Ключевые слова: бетон, критерии прочности, трехосное сжатие, экспериментальная проверка, рекомендации.

Представлены результаты разработки критерия прочности бетона для железобетонных конструкций, работающих в условиях трехосного сжатия (массивных колонн и ядер жесткости высотных зданий, защитных оболочек АЭС, плотин и др.), представлены его графическое представление и сопоставление с экспериментальными данными.

Для целого ряда особо ответственных конструкций зданий и сооружений характерна работа в условиях неодноосных (двух- и трехосных) напряженных состояний. Отсутствие достоверных критериев прочности бетона для случаев трехосных напряженных состояний является сдерживающим фактором для развития моделей деформирования бетона для общего случая объемного напряженного состояния. Такие общие расчетные модели особенно важны для обеспечения надежных проектных решений как для вновь возводимых объектов, так и для уточнения напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса ранее построенных.

Исходные зависимости для критерия прочности бетона при трехосном сжатии

За основу принят составной критерий прочности бетона при трехосном сжатии [1, 2] с последующим уточнением его соотношений для установления обобщенного критерия прочности.

Критерий прочности строится в главных напряжениях при $\sigma_3 \leq \sigma_2 \leq \sigma_1 \leq 0$; принимается что σ'_3 – предельно допустимые значения напряжений σ_3 , с которыми связывается прочность бетона при данном виде трехосного сжатия.

В исходном виде согласно [2], критерий прочности для бетона при трехосном сжатии записывается в следующем виде:

$$\sigma_3 = \sigma'_3 = -k_c R_b + \beta_{II} \sigma_1, \quad (1)$$

где k_c – функция влияния промежуточного напряжения σ_2 на прочность, определяемая выражением:

$$k_c = 1 + \frac{cR_{bt}}{R_b} [1 - d\mu_\sigma - (1-d)\mu_\sigma^3 - e(1-\mu_\sigma)^2], \quad (2)$$

где μ_σ – параметр Лоде-Надаи:

$$\mu_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}. \quad (3)$$



Коэффициенты c , e , d принимаются для обычных тяжелых бетонов равными: $c \approx 5$; $e \approx 0,44$; $d \approx 0,8$.

Параметр β_{Π} не является постоянной величиной и описывается согласно [1] дробной функцией следующего вида:

$$\beta_{\Pi} = \frac{1 + a' - a \frac{\sigma_1}{\sigma_3}}{b + (f_2 - b) \frac{\sigma_1}{\sigma_3}} = \frac{f_1 - a \frac{\sigma_1}{\sigma_3}}{b + (f_2 - b) \frac{\sigma_1}{\sigma_3}}, \quad (4)$$

где a , b , f_1 , f_2 – параметры материала.

Обобщенный критерий прочности при трехосном сжатии

Параметр β_{Π} может быть представлен следующим образом:

$$\beta_{\Pi} = \frac{f_1 - a \frac{\sigma_1}{\sigma_3}}{b + (f_2 - b) \frac{\sigma_1}{\sigma_3}} = \frac{f_1 \sigma_3 - a \sigma_1}{b \sigma_3 + (f_2 - b) \sigma_1}. \quad (5)$$

Обобщенный критерий прочности бетона при трехосном сжатии может быть получен путем подстановки выражения (5) в (1) при $\sigma_3 = \sigma'$:

$$\sigma_3^2 b + a \sigma_1^2 + \sigma_1 [(f_2 - b) - f_1] + k_c R_b b \sigma_3 + (f_2 - b) k_c R_b \sigma_1 = 0. \quad (6)$$

Вводя для компонента критерия (6) обозначения в виде:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1 &= k_c R_b b + \sigma_1 [(f_2 - b) - f_1], \\ \lambda_2 &= a \sigma_1^2 + (f_2 - b) k_c \sigma_1, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

получаем следующее решение квадратного уравнения (6):

$$\sigma_3 = \sigma'_3 = \frac{-\lambda_1 - \sqrt{\lambda_1^2 - 4b\lambda_2}}{2b}. \quad (8)$$

Для сопоставления с результатами экспериментальных исследований критерий (6) удобно представлять в относительных величинах напряжений относительно призмной прочности R_b . В результате получаем:

$$\sigma_3^2 b + \tilde{\sigma}_1 \tilde{\sigma}_3 [(f_2 - b) - f_1] + k_c \tilde{\sigma}_3 b + a \tilde{\sigma}_1^2 + (f_2 - b) k_c \tilde{\sigma}_1 = 0, \quad (9)$$

где $\tilde{\sigma}_1 = \sigma_1 / R_b$; $\tilde{\sigma}_3 = \sigma_3 / R_b$. (10)

При этом условия (7), (8):

$$\lambda_1 = k_c b + \tilde{\sigma}_1 [(f_2 - b) - f_1]; \quad \lambda_2 = a \tilde{\sigma}_1^2 + (f_2 - b) k_c \tilde{\sigma}_1. \quad (11)$$

Зависимости (9) – (11) могут быть использованы для подбора параметров a , b , f_1 , f_2 с целью получения наилучшей сходимости с экспериментальными данными.

Для случаев неравномерного трехосного сжатия ($\sigma_3 < \sigma_2 < \sigma_1 < 0$) предлагаются следующие зависимости для параметров материала:

$$f_1 = f_2 = 0,5; \quad (12)$$

$$a = -0,16 R_b + 0,63; \quad (13)$$

$$b = -0,001 R_b + 0,195. \quad (14)$$

Для случаев трехосного сжатия при равномерном боковом обжатии $\sigma_3 \leq (\sigma_1 = \sigma_2) < 0$ для представленных ниже экспериментальных данных наилучшая сходимость достигается при следующих значениях параметров:

$$a = -0,2; \quad b = 0,07. \quad (15)$$

Результаты экспериментальной проверки критерия (9)

Результаты экспериментальных исследований прочности и деформаций бетона в условиях трехосных напряженных состояний, полученные различными авторами, в ряде случаев имеют значительные расхождения вследствие высокой методической сложности такого рода экспериментов.

Для верификации критерия прочности бетона при трехосном сжатии использованы результаты экспериментов, выполненных группой отечественных ученых [3–5], а также данные зарубежных исследователей [6–27], полученные с применением достаточно совершенных методик испытаний.

В исследованиях [3, 5] испытания проводились на кубах с ребром 150 мм. Нагружение образцов выполнялось на специальной испытательной установке, позволяющей создавать высокие уровни сжимающих напряжений и независимое нагружение в трех ортогональных направлениях. Трение на границах контакта между поверхностями образцов и нагружающих штампов устранялось применением специально подобранных конструкций многослойных антифрикционных прокладок. Максимальные значения напряжений бокового сжатия в горизонтальной плоскости составляли 88 МПа.

Экспериментальные данные зарубежных авторов были получены на образцах цилиндрической и кубической форм. В испытаниях [12, 14, 17, 21, 22] образцов-цилиндров боковое обжатие осуществлялось давлением рабочей жидкости. Трение на границах контакта торцевых поверхностей цилиндров и загружающих плит устранялось с помощью антифрикционных прокладок из листов алюминиевой фольги и тефлона [12].

Испытания кубических образцов [10, 20, 21] проводились на установках, обеспечивающих независимое приложение сжимающих усилий по трем ортогональным направлениям. В большинстве случаев снижение влияния контактного трения осуществлялось за счет применения антифрикционных прокладок. В испытаниях [21] контактное трение не устранялось.

Особое внимание привлекают результаты экспериментальных исследований группы французских ученых (*Y. Malecot et al.*) [8, 9, 16, 18, 19, 23] в условиях трехосного сжатия с равномерным боковым обжатием высоких уровней (до 650 МПа). Боковое обжатие цилиндрических образцов диаметром 70 мм и высотой 140 мм создавалось за счет давления рабочей жидкости. Для защиты боковой поверхности образцов-цилиндров от проникновения рабочей жидкости использована многослойная мембрана из латекса.

При анализе все экспериментальные данные были разделены на две группы: для бетонов нормальной прочности классов до В50 и для высокопрочных бетонов классов В60 – В120. Сопоставление экспериментальных данных с расчетными значениями по критерию прочности (9) представлено:

- на рис. 1 – для двухосного сжатия: $\sigma_3 \leq \sigma_2 \leq (\sigma_1 = 0)$;
- на рис. 2–3 – для трехосного сжатия в условиях равного бокового обжатия: $\sigma_3 \leq (\sigma_1 = \sigma_2) < 0$;
- в таблице – для трехосного неравномерного сжатия: $\sigma_3 < \sigma_2 < \sigma_1 < 0$.

Условные обозначения опытных данных авторов на рис. 1 в экспериментальных исследованиях бетонов в условиях трехосного сжатия:

◆	<i>H. Kupfer</i> [5]	▲	Корсун В. И. [5]
□	<i>S. Lee et al.</i> [25]	◆	<i>S. Schroder et al.</i> [5]
○	<i>Geel, van H. J. G. M.</i> [5]	—	<i>X. Ren et al.</i> [26]
+	Яшин А. В. [4]	↷	<i>A. Hussein – H. Marzouk</i> [27]

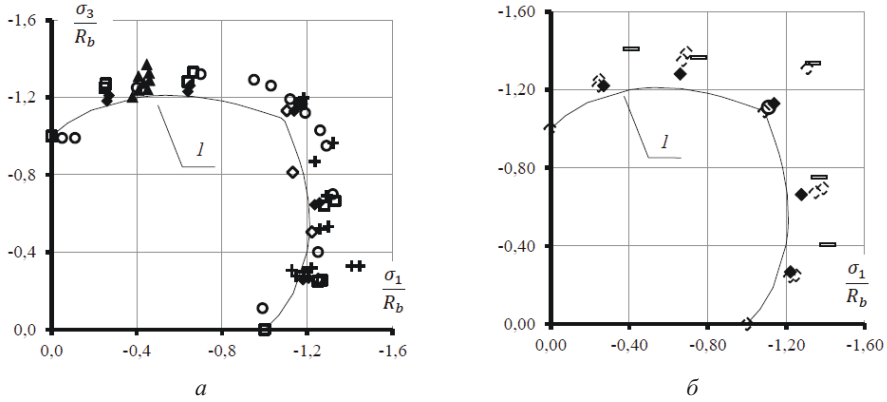


Рис. 1. Расчетные и экспериментальные значения прочности бетонов при двухосном сжатии: *a* – для бетонов с $R_b = 20\text{--}40$ МПа; *б* – для бетонов с $R_b = 40\text{--}100$ МПа; *l* – расчетные кривые по формулам (5) – (14)

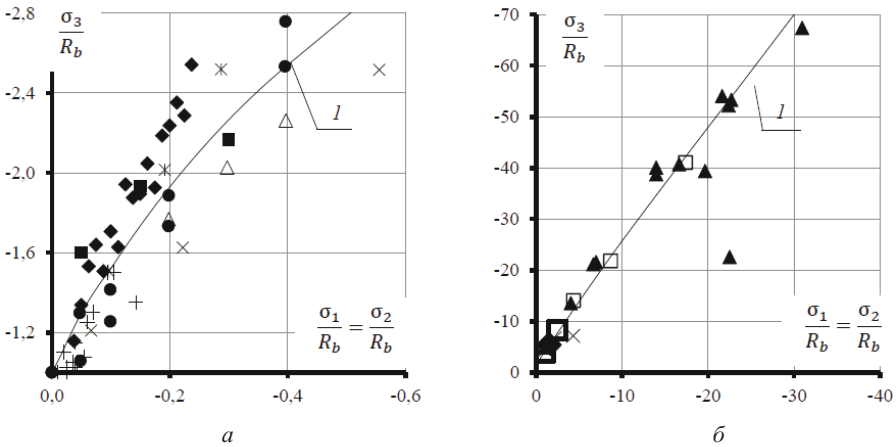


Рис. 2. Расчетные и экспериментальные значения прочности бетонов с $R_b = 20\text{--}50$ МПа при трехосном сжатии: *a* – для низких уровней бокового обжатия $|\sigma_1| = |\sigma_2| \leq R_b$; *б* – для высоких уровней бокового обжатия; *l* – расчетные кривые по формулам (5) – (14)

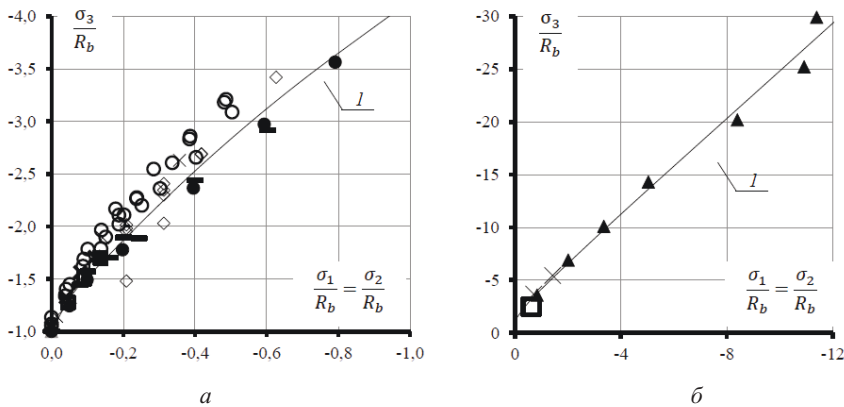


Рис. 3. Расчетные и экспериментальные значения прочности бетонов с $R_b = 50\text{--}130$ МПа при трехосном сжатии: *a* – для низких уровней бокового обжатия $|\sigma_1| = |\sigma_2| \leq R_b$; *б* – для высоких уровней бокового обжатия; *l* – расчетные кривые по формулам (5) – (14)

Расчетные и экспериментальные значения прочности бетонов в условиях неравномерного трехосного сжатия

σ_1 , МПа	σ_2 , МПа	σ_3 , МПа	R_{br} , МПа	$(\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3) / \sigma_3 $	R_{br} , МПа	μ_G	k_c	f_1	f_2	a	b	Предельное значение σ_3 , МПа / %	
												опытные данные	расчет по (9)
Экспериментальные данные He – Song [20]													
-14.36	-38.78	-143.63	60.16	-0.10 : -0.27 : -1	3.58	0.622	1.116	0.5	0.5	-3.296	0.140	-143.63 / 100%	-127.13 / 88.51%
-15.34	-64.43	-153.40	60.16	-0.10 : -0.42 : -1	3.58	0.289	1.161	0.5	0.5	-3.296	0.140	-153.40 / 100%	-132.25 / 86.21%
-15.77	-82.03	-157.74	60.16	-0.10 : -0.52 : -1	3.58	0.067	1.167	0.5	0.5	-3.296	0.140	-157.74 / 100%	-132.95 / 84.29%
-15.25	-117.45	-152.53	60.16	-0.10 : -0.77 : -1	3.58	-0.489	1.131	0.5	0.5	-3.296	0.140	-152.53 / 100%	-128.75 / 84.41%
Экспериментальные данные А. В. Яшина [4]													
-8.05	-37.90	-71.50	36.8	-0.11 : -0.53 : -1	2.58	0.059	1.197	0.5	0.5	0.442	0.163	-71.50 / 100%	-58.92 / 82.40%
-0.65	-38.80	-40.90	41.2	-0.02 : -0.95 : -1	2.78	-0.896	1.094	0.5	0.5	-0.262	0.159	-40.90 / 100%	-47.41 / 115.91%
-0.65	-40.30	-40.40	41.2	-0.02 : -1 : -1	2.78	-0.995	1.082	0.5	0.5	-0.262	0.159	-40.40 / 100%	-46.89 / 116.07%
-3.78	-31.50	-60.90	41.2	-0.06 : -0.52 : -1	2.78	0.029	1.190	0.5	0.5	-0.262	0.159	-60.90 / 100%	-59.64 / 97.93%
-3.85	-31.50	-59.10	41.2	-0.07 : -0.53 : -1	2.78	-0.001	1.189	0.5	0.5	-0.262	0.159	-59.10 / 100%	-60.19 / 101.85%
-3.78	-31.50	-60.00	41.2	-0.06 : -0.53 : -1	2.78	0.014	1.189	0.5	0.5	-0.262	0.159	-60.00 / 100%	-59.80 / 99.67%
-8.87	-40.00	-78.67	41.2	-0.11 : -0.51 : -1	2.78	0.108	1.190	0.5	0.5	-0.262	0.159	-78.67 / 100%	-70.36 / 89.44%
-6.30	-23.00	-76.50	48.6	-0.08 : -0.30 : -1	3.10	0.524	1.144	0.5	0.5	-1.446	0.151	-76.50 / 100%	-77.58 / 101.42%
-6.05	-27.00	-73.00	48.6	-0.08 : -0.37 : -1	3.10	0.374	1.165	0.5	0.5	-1.446	0.151	-73.00 / 100%	-79.39 / 108.76%
-6.60	-24.00	-80.00	48.6	-0.08 : -0.30 : -1	3.10	0.526	1.144	0.5	0.5	-1.446	0.151	-80.00 / 100%	-77.62 / 97.02%
-6.00	-34.50	-76.40	48.6	-0.08 : -0.45 : -1	3.10	0.190	1.178	0.5	0.5	-1.446	0.151	-76.40 / 100%	-78.39 / 102.60%
-5.70	-40.00	-80.40	48.6	-0.07 : -0.50 : -1	3.10	0.082	1.180	0.5	0.5	-1.446	0.151	-80.40 / 100%	-75.72 / 94.18%
-8.40	-39.60	-75.00	48.6	-0.11 : -0.55 : -1	3.10	0.063	1.180	0.5	0.5	-1.446	0.151	-75.00 / 100%	-93.90 / 125.21%



Условные обозначения опытных данных авторов на рис. 2–3 в экспериментальных исследованиях бетонов в условиях трехосного сжатия:

◆	<i>P. Javanmardi</i> [22]	□	<i>T. L. Warren</i> [15]
■	<i>D. Sfer et al.</i> [14]	▲	<i>Y. Malecot et al.</i> [8, 9, 16, 18, 19, 23]
△	<i>Q. Li – F. Ansari</i> [13]	◇	<i>X. Lu – C.-T. T. Hsu</i> [17]
×	<i>Geel, van H. J. G. M.</i> [10]	▬	<i>R. Sovjak et al.</i> [21]
✱	<i>D. C. Candappa et al.</i> [7]	—	<i>Z. He – Y. Song</i> [20]
●	<i>Imran I. – Pantazopoulou</i> [12]	◻	<i>Attard M. M. – Setunge S.</i> [6]
+	<i>T. C. Hansen</i> [5]	○	<i>J. Xie et al.</i> [24]
◇	Корсун В. И. – Калмыков Ю. Ю. [3]	◼	Корсун В. И. – Недорезов А. В. [3]

Вывод

Уточненный критерий прочности в форме соотношений (6)–(9) при установленных на основе экспериментальных данных прочностных параметрах материала позволяет с достаточной точностью оценивать прочность обычных и высокопрочных бетонов при различных напряженных состояниях двух- и трехосного сжатия и может быть рекомендован для включения в нормы проектирования.

Работа выполнена в рамках НИР по программе Фундаментальных научных исследований РААСН на 2021–2023 гг. по теме № 3.1.1.5 «Определение критериев прочности и соотношений между напряжениями и деформациями бетонов средней и высокой прочности при трехосном сжатии и его частных случаях».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карпенко, Н. И. Общие модели механики железобетона / Н. И. Карпенко. – Москва : Стройиздат, 1996. – 416 с. – ISBN 5-274-01682-0. – Текст : непосредственный.
2. Карпенко, Н. И. Определение прочности и ориентации площадок разрушения при различных видах объемного напряженного состояния / Н. И. Карпенко, С. Н. Карпенко // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. – Volume 11, Issue 4. – 2015. – С. 52–61.
3. Korsun, V. The Influence of the Initial Concrete Strength on its Deformation under Triaxial Compression / Korsun V., Kalmykov Yu., Niedoriezov A., Korsun A. // *Procedia Engineering*. – 2015. – № 117. – P. 959–969.
4. Рекомендации по определению прочностных и деформационных характеристик бетона при не одноосных напряженных состояниях. – Москва : НИИЖБ, 1985. – 72 с.
5. Корсун, В. И. Сопоставительный анализ критериев прочности бетона / В. И. Корсун, А. В. Недорезов, С. Ю. Макаренко // *Современное промышленное и гражданское строительство*. – 2014. – Том 10, № 1. – С. 65–78.
6. Attard, M. M. Stress-strain relationship of confined and unconfined concrete / M. M. Attard, S. Setunge // *ACI Mater. J.* – 1196. – № 935. – P. 432–442.
7. Candappa, D. C. Complete triaxial stress-strain curves of high-strength concrete / D. C. Candappa, J. G. Sanjayan, S. Setunge. // *Coll. Math. J.* – 2001. – № 13(3). – P. 209–215.
8. Dupray, F. A mesoscopic model for the behaviour of concrete under high confinement / F. Dupray, Y. Malecot, L. Daudeville, E. Buzaud // *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. – 2009. – № 33. – P. 1407–1423.
9. Gabet, T. Triaxial behaviour of concrete under high stresses: Influence of the loading path on compaction and limit states / T. Gabet, Y. Malecot, L. Daudeville // *Cement and Concrete Research*. – 2007. – № 38(3). – P. 403–412.
10. Geel, van H. J. G. M. Concrete behaviour in multiaxial compression: experimental research / Geel, H. J. G. M. van Geel // *Technische Universiteit Eindhoven*. – 1998. – P. 178.



11. Hansen, T. C. Triaxial Tests with Concrete and Cement Paste / Danmarks Tekniske Universitet. – Danish : Print Book, 1995. – P. 53. – ISBN 87-7740-156-5.
12. Imran, I. Experimental study of plain concrete under triaxial stress / I. Imran, S. J. Pantazopoulou // *ACI Mater. J.* – 1996. – № 936. – P. 589–601.
13. Li, Q. "Mechanics of damage and constitutive relationships for high-strength concrete in triaxial compression" / Q. Li, F. Ansari // *J. Eng. Mech.* – 1999. – Vol. 125, № 1. – P. 1–10. – URL: [[http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1999\)125:1\(1\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1999)125:1(1))].
14. "Study of the behavior of concrete under triaxial compression" / D. Sfer, I. Carol, R. Gettu, G. Etse // *J. Eng. Mech.* – 2002. – Vol. 128, № 2. – P. 156–163.
15. Warren, T. L. Penetration into low-strength (23 MPa) concrete: target characterization and simulations / T. L. Warren, A. F. Fossum, D. J. Frew // *International Journal of Impact Engineering.* – 2004. – № 30. – P. 477–503.
16. Gabet, T. Daudeville. A new experimental technique for the analysis of concrete under high triaxial loading / T. Gabet, X. H. Vu, Y. Malecot, L. J. // *Phys. IV France.* – 2006. – № 134. – P. 635–640.
17. X. Lu. Behavior of high strength concrete with and without steel fiber reinforcement in triaxial compression / X. Lu, C.-T. T. Hsu // *Cement and Concrete Research.* – 2006. – № 36. – P. 1679-1685.
18. Experimental analysis of concrete behavior under high confinement: Effect of the saturation ratio / X. H. Vu, Y. Malecot, L. Daudeville, E. Buzaud // *International Journal of Solids and Structures.* – 2009. – № 46. – P. 1105–1120.
19. Malecot, Y. Unconfined compressive strength is a poor indicator of the high-pressure mechanical response of concrete / Y. Malecot, X. H. Vu, L. Daudeville // *DYMAT.* – 2009 (2009). – P. 1325–1331.
20. He, Z. Triaxial strength and failure criterion of plain high-strength and high-performance concrete before and after high temperatures / Z. He, Y. Song // *Cement and Concrete Research.* – 2010. – № 40. – P. 171–178.
21. Sovjak, R. Triaxial compressive strength of ultra high performance concrete / R. Sovjak, F. Vogel, B. Beckmann // *ActaPolytechnica.* – 2013. – № 53 (6). – P. 901–905.
22. Javanmardi, P. Experimental Study of Triaxial Behavior of Concrete under Lateral Confining Stress / P. Javanmardi // *The Open Civil Engineering Journal.* – 2017. – № 11. – P. 281–291. – DOI: 10.2174/1874149501711010281.
23. Vy, X. N. Effect of coarse aggregate size and cemen paste volume on concrete behavior under high triaxial compression loading / X. N. Vy, L. Daudeville, Y. Malecot // *Construction and Building materials.* – 2011. – № 25. – P. 3941–3949.
24. Xie, J. Mechanical properties of three high-strength concretes containing silica fume / J. Xie, A. E. Elwi, J. G. MacGregor // *Mater J.* – 1995. – Vol. 92, № 2. – P. 135–145.
25. S. Lee, Y. Song, S. Han Biaxial behavior of plain concrete of nuclear containment building / S. Lee, Y. Song, S. Han // *Nuclear Engineering and Design.* —2004. – № 227. – C. 143–153.
26. Ren, X. Behavior of High-Performance Concrete under Uniaxial and Biaxial Loading / X. Ren, W. Yang, Y. Zhou // *ACI Materials Journal.* – 2008. – Title № 105-M62. – P. 548–557.
27. Hussein, A. Behavior of High-Strength Concrete under Biaxial Stresses / A. Hussein, H. Marzouk // *ACI Materials Journal.* – V. 97, № 1. – P. 27–36.

KARPENKO Nikolay Ivanovich, academician of RAACS, doctor of technical sciences, professor¹; KORSUN Vladimir Ivanovich, doctor of technical sciences, professor²; KARPENKO Sergey Nikolaevich, doctor of technical sciences¹, ANUSCHENKO Aleksandr Mikhaylovich, postgraduate student²

STRENGTH CRITERION OF CONCRETE UNDER TRIAXIAL COMPRESSION



¹Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences
21, Lokomotivny driveway, Moscow, 127238, Russia. Tel.: +7 (495) 482-40-18;
e-mail: niisf_lab9@mail.ru

²Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University
29, Polytekhnicheskaya St., Saint-Petersburg, 195251, Russia. Tel.: +7 (921) 757-82-60,
+7 (930) 707-74-24; e-mail: korsun_vi@mail.ru, aleksander.anusch@yandex.ru

Key words: concrete, strength criteria, triaxial compression, experimental verification, recommendations.

The article presents the results of development of a concrete strength criterion for reinforced concrete structures operating under conditions of triaxial compression such as massive columns and stiffness cores of high-rise buildings, protective shells of nuclear power plants, dams, etc. Its graphical representation and comparison with experimental data are given.

REFERENCES

1. Karpenko N. I. *Obschie modeli mekhaniki zhelezobetona* [General models of reinforced concrete mechanics]. Moscow : Stroyizdat, 1996, 416 p. – ISBN 5-274-01682-0.
2. Karpenko N. I., Karpenko S. N. *Opreделение prochnosti i orientatsii ploschadok razrusheniya pri razlichnykh vidakh obyomnogo napryazhyonnogo sostoyaniya* [Determination of the strength and orientation of fracture sites under various types of volumetric stress rate] / *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. - Volume 11, Issue 4. – 2015. – P. 52–61.
3. Korsun V., Kalmykov Yu., Nedorezov A., Korsun A. *The Influence of the Initial Concrete Strength on its Deformation under Triaxial Compression* / *Procedia Engineering*. – 117 (2015). – P. 959-969.
4. *Rekomendatsii po opredeleniyu prochnostnykh i deformatsionnykh kharakteristik betona pri neodnoosnykh napryazhyonnykh sostoyaniyakh* [Recommendations for determining strength and deformation characteristics of concrete under non-axial stress conditions] – Moscow: NIIZhB, 1985. – 72 p.
5. Korsun V. I., Nedorezov A. V., Makarenko S. Yu. *Sopostavitelny analiz kriteriev prochnosti betona* [Comparative analysis of concrete strength criteria] / *Sovremennoe promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo* [Modern Industrial and Civil Construction]. – 2014. Vol. 10. – № 1. – P. 65–78.
6. Attard M. M., Setunge S. *Stress-strain relationship of confined and unconfined concrete* / *ACI Mater. J.* – 1196. – № 935. – P. 432–442.
7. Candappa D. C., Sanjayam J. G., Setunge S. *Completetriaaxial stress-strain curves of high-strength concrete* / D.C. Candappa, J.G. Sanjayam, S. Setunge. // *Coll. Math. J.* – 2001. – № 13(3). – P. 209–215.
8. Dupray F., Malecot Y., Daudeville L., Buzaud E. *A mesoscopic model for the behaviour of concrete under high confinement* / *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. – 2009. – № 33. – P. 1407–1423.
9. Gabet T., Malecot Y., Daudeville L. *Triaxial behaviour of concrete under high stresses: Influence of the loading path on compaction and limit states* / *Cement and Concrete Research*. – 2007. – № 38(3). – P. 403–412.
10. Geel, van H.J.G.M. *Concrete behaviour in multiaxial compression: experimental research* / Technische Universiteit Eindhoven. –1998. – P.178.
11. Hansen T. C. *Triaxial Tests with Concrete and Cement Paste*. Danmarks Tekniske Universitet. – Danish : Print Book, 1995. – P. 53. – ISBN 87-7740-156-5.
12. Imran I., Pantazopoulou S. J. *Experimental study of plain concrete under triaxial stress*. *ACI Mater. J.*, – 1996. – № 936. – P. 589–601.
13. Q. Li, Ansari F. *Mechanics of damage and constitutive relationships for high-strength concrete in triaxial compression*. *J. Eng. Mech.* 1999. Vol. 125, № 1. P. 1–10. URL: [http://dx.doi.



org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1999)125:1(1)].

14. Sfer D., Carol I., Gettu R., Etse G. Study of the behavior of concrete under triaxial compression. *J. Eng. Mech.* – 2002. – Vol. 128, № 2. – P. 156–163.

15. Warren T. L., Fossum A. F., Frew D. J. Penetration into low-strength (23 MPa) concrete: target characterization and simulations. *International Journal of Impact Engineering*, 2004, № 30. P. 477–503.

16. Gabet T., Vu X. H., Malecot Y., Daudeville L. A new experimental technique for the analysis of concrete under high triaxial loading. *J. Phys. IV France.* – 2006. – № 134. – P. 635–640.

17. Lu X., Hsu C.-T. T. Behavior of high strength concrete with and without steel fiber reinforcement in triaxial compression. *Cement and Concrete Research.* – 2006. – № 36. – P. 1679–1685.

18. Vu X. H., Malecot Y., Daudeville L., Buzaud E. Experimental analysis of concrete behavior under high confinement: Effect of the saturation ratio. *International Journal of Solids and Structures.* – 2009. – № 46. – P. 1105–1120.

19. Malecot Y., Vu X. H., Daudeville L. Unconfined compressive strength is a poor indicator of the high-pressure mechanical response of concrete. *DYMAT. 2009 (2009).* P. 1325–1331.

20. He Z., Song Y. Triaxial strength and failure criterion of plain high-strength and high-performance concrete before and after high temperatures. *Cement and Concrete Research.* – 2010. – № 40. – P. 171–178.

21. Sovjak R., Vogel F., Beckmann B. Triaxial compressive strength of ultra high performance concrete. *Acta Polytechnica.* – 2013. – № 53 (6). – P. 901–905.

22. Javanmardi P. Experimental Study of Triaxial Behavior of Concrete under Lateral Confining Stress. *The Open Civil Engineering Journal.* – 2017. – № 11. – P. 281–291. – DOI: 10.2174/1874149501711010281.

23. Vy X. N., Daudeville L., Malecot Y. Effect of coarse aggregate size and cement paste volume on concrete behavior under high triaxial compression loading. *Construction and Building materials.* – 2011. – № 25. – P. 3941–3949.

24. Xie J., Elwi A. E., MacGregor J. G. Mechanical properties of three high-strength concretes containing silica fume. *Mater. J.* – 1995. – Vol. 92, № 2. – P. 135–145.

25. Lee S., Song Y., Han S. Biaxial behavior of plain concrete of nuclear containment building. *Nuclear Engineering and Design.* – 2004. – № 227. – C. 143–153.

26. Ren X., Yang W., Zhou Y. Behavior of High-Performance Concrete under Uniaxial and Biaxial Loading. *ACI Materials Journal.* – 2008. – Title № 105-M62. – P. 548–557.

27. Hussein A., Marzouk H. Behavior of High-Strength Concrete under Biaxial Stresses. *ACI Materials Journal.* – V. 97, № 1. – P. 27–36.

© Н. И. Карпенко, В. И. Корсун, С. Н. Карпенко, А. М. Анущенко, 2022

Получено: 10.09.2022 г.

УДК 624.046

П. А. ХАЗОВ¹, канд. техн. наук, доц. кафедры теории сооружений и технической механики, зав. лабораторией непрерывного контроля технического состояния зданий и сооружений; **В. И. ЕРОФЕЕВ²**, д-р физ.-мат. наук, профессор, директор; **Д. М. ЛОБОВ¹**, ст. преподаватель кафедры строительных конструкций; **А. П. ПОМАЗОВ**, ассистент кафедры строительных конструкций¹, инженер³; **А. К. СИТНИКОВА¹**, студент

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСЧЕТНЫХ ДЛИН
И КОЭФФИЦИЕНТОВ ПРОДОЛЬНОГО ИЗГИБА КОМПОЗИТНЫХ
ТРУБОБЕТОННЫХ ОБРАЗЦОВ**