

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

УДК 624.012.042.8.001.2

DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-4-138-145

З.Р. ГАЛЯУТДИНОВ,

Томский государственный архитектурно-строительный университет

ДИНАМИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА ПРИ ПЛОСКОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

Современные расчетные модели должны учитывать основные особенности динамического деформирования железобетона. В настоящее время основные закономерности нелинейного динамического деформирования железобетона при одноосном напряженном состоянии достаточно подробно рассмотрены в теоретическом плане при наличии широкого спектра экспериментальных исследований. Свойства бетона в условиях двухосного напряженно-деформированного состояния при кратковременном динамическом нагружении изучены в меньшей степени. В настоящей работе предложен критерий динамической прочности бетона, учитывающий изменение коэффициента динамического упрочнения бетона в зависимости от вида напряженного состояния, соотношения главных напряжений σ_3/σ_1 и скорости деформирования $\dot{\epsilon}$.

Ключевые слова: критерий прочности бетона; плоское напряженное состояние; двухосное сжатие; растяжение-сжатие; кратковременная динамическая нагрузка; напряжения; прочность бетона; экспериментальные данные.

Для цитирования: Галяутдинов З.Р. Динамический критерий прочности бетона при плоском напряженном состоянии // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. № 4. С. 138–145. DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-4-138-145

Z.R. GALYAUTDINOV,

Tomsk State University of Architecture and Building

DYNAMIC STRENGTH CONDITION OF CONCRETE UNDER PLANE STRESS STATE

Modern calculation models must take into account the dynamic deformation of reinforced concrete. Currently, the main regularities of nonlinear dynamic deformation of reinforced concrete under uniaxial stress state are theoretically analyzed in detail along with a wide range of experimental studies. Properties of concrete under plane stress-strain state and dynamic loading are examined to a lesser extent. This paper proposes the dynamic strength condition for the concrete strength which allows for changing the strain-hardening coefficient of concrete depending on the type of stress-strain state, the ratio of the primary stresses and the deformation rate.

Keywords: concrete strength condition; plane stress-strain state; biaxial compression; expansion-compression; dynamic load; stress; concrete strength; experimental data.

For citation: Galyautdinov Z.R. Dinamicheskii kriterii prochnosti betona pri ploskom napryazhennom sostoyanii [Dynamic strength condition of concrete under plane stress state]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2019. V. 21. No. 4. Pp. 138–145.

DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-4-138-145

Динамический критерий прочности бетона при плоском напряженном состоянии имеет большое значение при формировании расчетных моделей железобетона [3, 5]. При решении задач в основном критерий динамической прочности получается из статического путем трансформации последнего вдоль временной оси [2–4]. При этом изменение прочности бетона при динамическом нагружении учитывается коэффициентами динамического упрочнения при одноосном сжатии k_{db} и растяжении k_{abt} . Так, в области «сжатие-сжатие» коэффициент динамического упрочнения бетона принимается постоянным в пределах всего диапазона значений σ_3/σ_1 при заданном значении скорости деформирования $\dot{\epsilon}$. В области «растяжение-сжатие», ввиду разных значений k_{db} и k_{abt} , коэффициент динамического упрочнения меняется пропорционально соотношению главных напряжений σ_1 и σ_3 .

Вместе с тем экспериментальные исследования бетона при динамическом нагружении, представленные в работах [6–8], свидетельствуют о неодинаковом изменении прочности бетона в зависимости от соотношения σ_3/σ_1 как в области «сжатие-сжатие», так и в области «растяжение-сжатие» (рис. 1). Таким образом, для достоверного определения динамической прочности бетона при плоском напряженном состоянии необходимо учитывать влияние σ_3/σ_1 на коэффициент динамического упрочнения бетона.

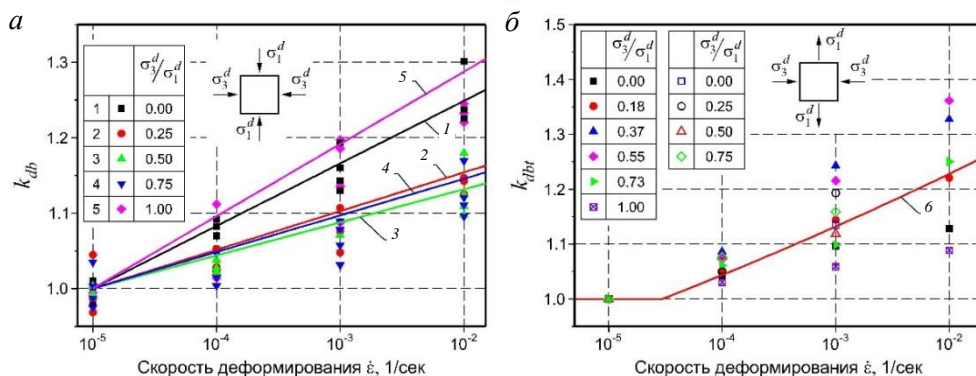


Рис. 1. Изменение коэффициента динамического упрочнения бетона в области «сжатие-сжатие» [8] и «растяжение-сжатие» [6, 7]:

1–5 – по данным работы [8]; 6 – при одноосном растяжении

Критерий динамической прочности бетона при двухосном напряженном состоянии получим на основе общих принципов построения предельных по-

верхностей с учетом имеющихся опытных данных о динамическом деформировании бетона в условиях сжатия-сжатия [7, 8] и растяжения-сжатия [6, 7].

Предельная поверхность в пространстве главных напряжений σ_1, σ_3 может быть представлена как функция двух инвариантов $\bar{\sigma}_0, \bar{\tau}_0$ [1]. Здесь $\bar{\sigma}_0 = \frac{1}{3}(\bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_3)$ – среднее нормальное напряжение на октаэдрической площадке при плоском напряженном состоянии; $\bar{\sigma}_1, \bar{\sigma}_3$ – предельные значения главных напряжений; $\bar{\tau}_0 = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{\bar{\sigma}_1^2 - \bar{\sigma}_1 \bar{\sigma}_3 + \bar{\sigma}_3^2}$ – касательные напряжения на октаэдрической площадке при плоском напряженном состоянии.

Условие прочности бетона при плоском напряженном состоянии может быть выражено в следующем виде [1]:

$$\bar{\tau}_0 f(\xi) = a, \quad (1)$$

где a – константа материала; $f(\xi)$ – некоторая функция, зависящая от параметра $\xi = \bar{\sigma}_0/\bar{\tau}_0$.

Принимая значение функции $f(\xi) = 1$ в точке одноосного сжатия, получим

$$a = \frac{\sqrt{2}}{3} R_b. \quad (2)$$

Значение ξ изменяется в интервале $-\sqrt{2} \leq \xi \leq \sqrt{2}$. При этом $\xi = -\sqrt{2}$ соответствует области двухосного равномерного сжатия, $\xi = -\sqrt{2}/2$ – области одноосного сжатия, $\xi = \sqrt{2}/2$ – области одноосного растяжения, $\xi = \sqrt{2}$ – области двухосного равномерного растяжения.

Распределение опытных данных [7, 8] в осях координат $\xi, f(\xi)$ для области двухосного сжатия представлено на рис. 2. Распределение данных в области «сжатие-сжатие» носит нелинейный характер. При этом по мере увеличения скорости деформирования кривизна распределения снижается, и при $\dot{\epsilon} = 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ наблюдается близкое к линейному виду расположение опытных данных. В связи с этим описание функции $f(\xi)$ при двухосном сжатии единой кривой не представляется возможным.

Для теоретического описания опытных данных в области «сжатие-сжатие» примем зависимость вида

$$f(\xi) = a_1 + b_1 \xi + c_1 \xi^2, \quad (3)$$

где a_1, b_1, c_1 – константы материала.

Постоянные a_1 и b_1 определяются из условия прохождения кривой, ограничивающей динамическую область прочного сопротивления бетона при двухосном сжатии, через точки одноосного сжатия $f(-\sqrt{2}/2) = \frac{1}{k_{db}}$ и двухос-

ного равномерного сжатия $f(-\sqrt{2}) = \frac{R_b}{R_{b2c}} \frac{1}{k_{db}}$. Постоянная c_1 определяется из

условия наилучшего совпадения с опытными данными. Тогда уравнение (3) будет иметь вид

$$f(\xi) = \left(\frac{2}{k_{db}} - \frac{R_b}{R_{b2c}} \frac{1}{k_{db}} + c_1 \right) + \frac{2}{\sqrt{2}} \left(\frac{R_b}{R_{b2c}} \frac{1}{k_{db}} - \frac{1}{k_{db}} - \frac{3}{2} c_1 \right) \xi + c_1 \xi^2, \quad (4)$$

где R_b – расчетное сопротивление бетона при статическом сжатии; R_{b2c} – прочность бетона при равномерном двухосном сжатии.

Параметр c_1 принимается равным $c_1 = 0,75; 0,55; 0,35; 0,15$ соответственно при скоростях деформирования $\dot{\epsilon} = 10^{-5}; 10^{-4}; 10^{-3}; 10^{-2} \text{ с}^{-1}$. Изменение функции $f(\xi)$ показано на рис. 2 (кривая I).

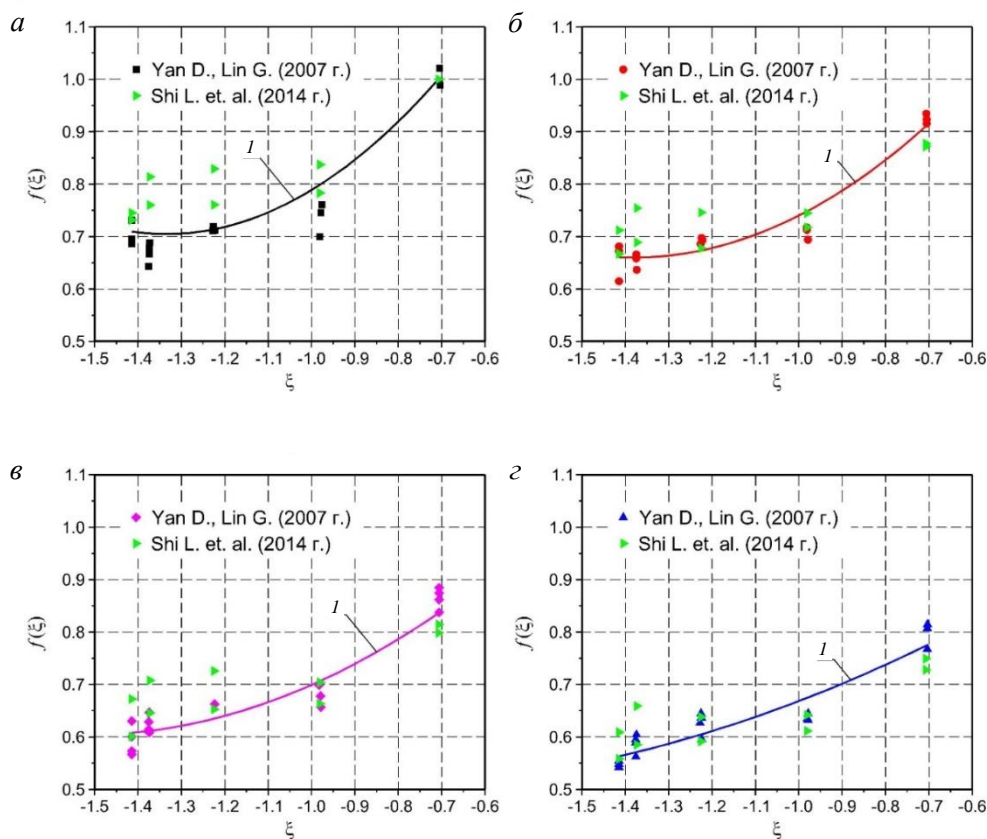


Рис. 2. Распределение опытных данных в области «сжатие-сжатие» [7, 8]:

a – при $\dot{\epsilon} = 10^{-5} \text{ с}^{-1}$; $б$ – при $\dot{\epsilon} = 10^{-4} \text{ с}^{-1}$; $в$ – при $\dot{\epsilon} = 10^{-3} \text{ с}^{-1}$; $г$ – при $\dot{\epsilon} = 10^{-2} \text{ с}^{-1}$; I – по формуле (4)

Критерий прочности в виде (1) с учетом (4) в осях главных напряжений σ_1, σ_3 представлен на рис. 3. Как видно из графиков, полученные зависимости удовлетворительно согласуются с опытными данными при различных скоростях деформирования.

Теоретическая зависимость в области «растяжение-сжатие» также принимается в виде (3). При этом постоянные a_1 и b_1 определим из условия прохождения кривой, ограничивающей динамическую область прочного сопротивления бетона при двухосном растяжении-сжатии, через точки одноосного сжатия $f(-\sqrt{2}/2) = \frac{1}{k_{db}}$ и одноосного растяжения $f(\sqrt{2}/2) = \frac{R_b}{R_{bt}} \frac{1}{k_{dbt}}$, где R_{bt} – расчетное сопротивление бетона при статическом растяжении. Постоянная c_1 также определяется из условия наилучшего совпадения с опытными данными.

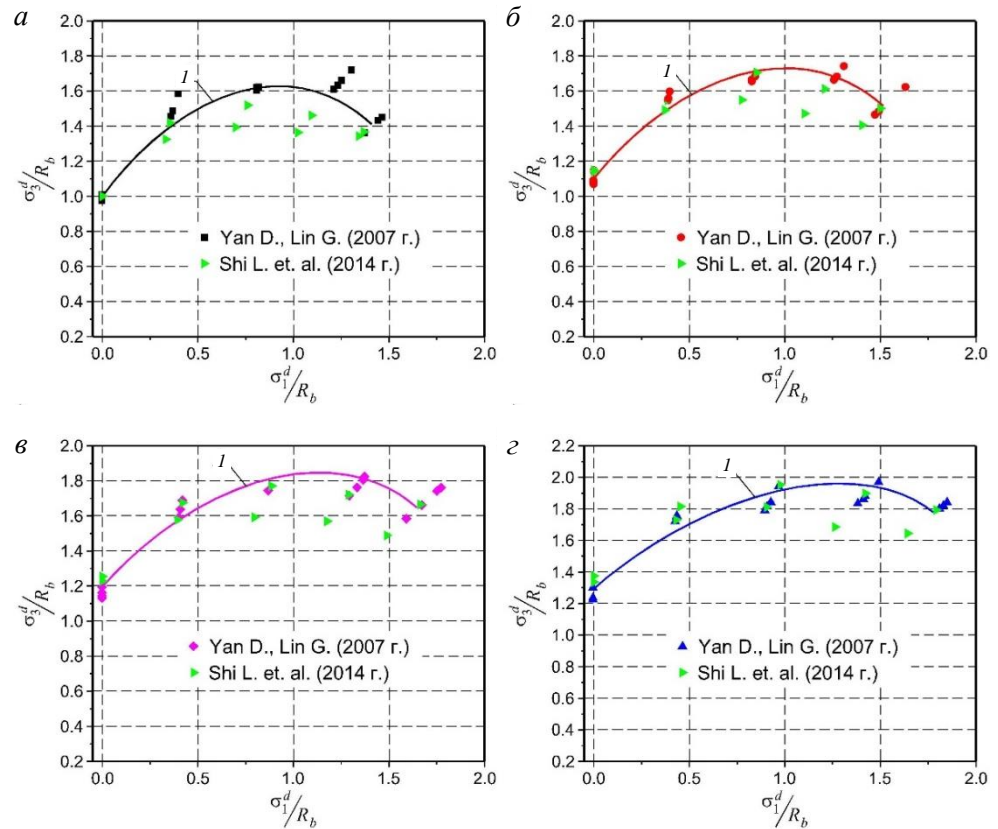


Рис. 3. Критерий прочности бетона в области «сжатие-сжатие»:

а – при $\dot{\varepsilon} = 10^{-5} \text{ с}^{-1}$; б – при $\dot{\varepsilon} = 10^{-4} \text{ с}^{-1}$; в – при $\dot{\varepsilon} = 10^{-3} \text{ с}^{-1}$; г – при $\dot{\varepsilon} = 10^{-2} \text{ с}^{-1}$; I – по формулам (1) и (4)

Таким образом, уравнение (3) получит вид

$$f(\xi) = \left(\frac{1}{2k_{db}} + \frac{1}{2k_{dbt}} \frac{R_b}{R_{bt}} - \frac{1}{2}c_1 \right) + \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{1}{k_{dbt}} \frac{R_b}{R_{bt}} - \frac{1}{k_{db}} \right) \xi + c_1 \xi^2. \quad (5)$$

Изменение функции $f(\xi)$ в сравнении с экспериментальными данными [6, 7] показано на рис. 4. Значение величины c_1 принимается равным

$c_1 = -1,8; -1,5; -1,2; -0,9$ соответственно при скоростях деформирования $\dot{\varepsilon} = 10^{-5}; 10^{-4}; 10^{-3}; 10^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Критерий прочности бетона в осях главных напряжений σ_1, σ_3 при растяжении-сжатии представлен на рис. 5. Полученные зависимости с достаточной степенью точности описывают экспериментальные данные.

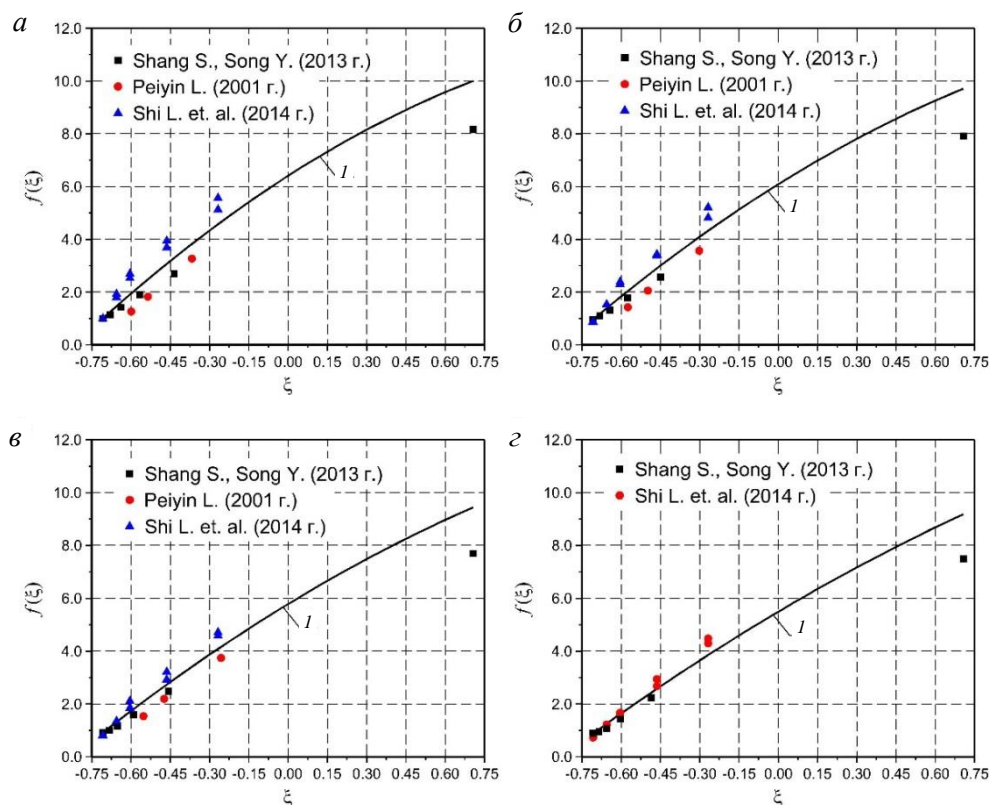


Рис. 4. Распределение экспериментальных данных в области «растяжение-сжатие» [6, 7]:
а – при $\dot{\varepsilon} = 10^{-5} \text{ с}^{-1}$; б – при $\dot{\varepsilon} = 10^{-4} \text{ с}^{-1}$; в – при $\dot{\varepsilon} = 10^{-3} \text{ с}^{-1}$; г – при $\dot{\varepsilon} = 10^{-2} \text{ с}^{-1}$; I – по формуле (5)

Параметр c_1 в выражениях (4) и (5) не является постоянной величиной, а меняется в зависимости от скорости деформирования $\dot{\varepsilon}$. На основе имеющихся данных значение параметра c_1 при $10^{-5} \text{ с}^{-1} \leq \dot{\varepsilon} \leq 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ может быть найдено по следующим зависимостям:

– в области «сжатие-сжатие» ($\sigma_1^d < 0, \sigma_3^d < 0$)

$$c_1 = -0,25 - 0,2 \lg(\dot{\varepsilon}); \quad (6)$$

– в области «сжатие-растяжение» ($\sigma_1^d < 0, \sigma_3^d > 0$)

$$c_1 = -0,3 + 0,3 \lg(\dot{\varepsilon}). \quad (7)$$

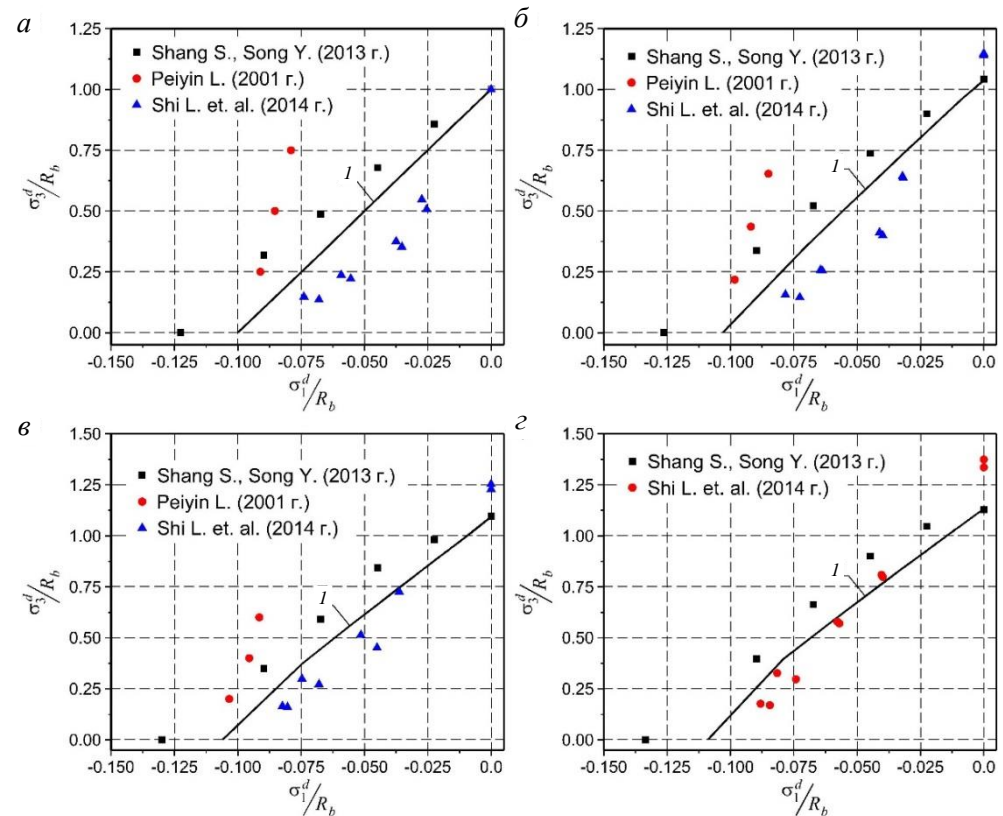


Рис. 5. Критерий прочности бетона в области «растяжение-сжатие»:

а – при $\dot{\varepsilon} = 10^{-5} \text{ c}^{-1}$; б – при $\dot{\varepsilon} = 10^{-4} \text{ c}^{-1}$; в – при $\dot{\varepsilon} = 10^{-3} \text{ c}^{-1}$; г – при $\dot{\varepsilon} = 10^{-2} \text{ c}^{-1}$; I – по формулам (1) и (5)

Таким образом, по результатам выполненных исследований предложен критерий динамической прочности бетона при плоском напряженном состоянии, учитывающий напряженное состояние, влияние скорости деформирования и соотношения напряжений σ_3/σ_1 . Полученные результаты удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карпенко Н.И., Круглов В.М., Соловьев Л.Ю. Нелинейное деформирование бетона и железобетона. Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2001. 276 с.
2. Кумпяк О.Г. Совершенствование методов расчета железобетонных плоскостных конструкций при статическом и кратковременном динамическом нагружении : дис. ... докт. техн. наук. Томск, 1996. 473 с.
3. Кумпяк О.Г., Галяутдинов З.Р., Кокорин Д.Н. Прочность и деформативность железобетонных конструкций на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении. Томск : Изд-во ТГАСУ, 2016. 270 с.
4. Плевков В.С. Прочность и трещиностойкость эксплуатируемых железобетонных конструкций зданий и сооружений при статическом и кратковременном динамическом нагружении : дис. ... докт. техн. наук. Томск, 2003. 536 с.

5. Galyautdinov Z.R. Deformation of reinforced concrete slabs on yielding supports under short-time dynamic loading // *AIP Conference Proceedings*. 2017. 1800. 010001. DOI: 10.1063/1.4973016.
6. Shang S., Song Y. Dynamic biaxial tensile-compressive strength and failure criterion of plain concrete // *Construction and Building Materials*. 2013. V. 40. № 2. P. 322–329.
7. Shi L., Wang L., Song Y., Shen L. Dynamic multiaxial strength and failure criterion of dam concrete // *Construction and Building Materials*. 2014. V. 66. № 2. P. 181–191.
8. Yan D., Lin G. Dynamic behaviour of concrete in biaxial compression // *Magazine of Concrete Research*. 2007. V. 59. № 1. P. 45–52.

REFERENCES

1. Karpenko N.I., Kruglov V.M., Solov'ev L.Y. Nelineynoye deformirovaniye betona i zhelezobetona [Nonlinear deformation of concrete and reinforced concrete]. Novosibirsk: STU, 2001. 276 p. (rus)
2. Kumpyak O.G. Sovershenstvovaniye metodov rascheta zhelezobetonnykh ploskostnykh konstruktsey pri staticheskom i kratkovremennom dinamicheskom nagruzhenii [Improvement of calculating methods of reinforced-concrete plane structures under static and dynamic loading. DSc Thesis]. Tomsk, 1996. 473 p. (rus)
3. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Kokorin D.N. Prochnost' i deformativnost' zhelezobetonnykh konstruktsiy na podatlivykh oporakh pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhenii [Strength and deformability of reinforced concrete structures on yielding supports under dynamic loading]. Tomsk: TSUAB, 2016. 270 p. (rus)
4. Plevkov V.S. Prochnost' i treshchinostoykost' ekspluatiruyemykh zhelezobetonnykh konstruktsey zdaniy i sooruzheniy pri staticheskom i kratkovremennom dinamicheskom nagruzhenii [Strength and crack resistance of reinforced concrete structures under static and dynamic loading. DSc Thesis]. Tomsk, 2003. 536 p. (rus)
5. Galyautdinov Z.R. Deformation of reinforced concrete slabs on yielding supports under short-time dynamic loading. *AIP Conference Proceedings*. 2017. 1800. P. 010001. DOI: 10.1063/1.4973016.
6. Shang S., Song Y. Dynamic biaxial tensile-compressive strength and failure criterion of plain concrete. *Construction and Building Materials*. 2013. V. 40. No. 2. Pp. 322–329.
7. Shi L., Wang L., Song Y., Shen L. Dynamic multiaxial strength and failure criterion of dam concrete. *Construction and Building Materials*. 2014. V. 66. No. 2. Pp. 181–191.
8. Yan D., Lin G. Dynamic behaviour of concrete in biaxial compression. *Magazine of Concrete Research*. 2007. V. 59. No. 1. Pp. 45–52.

Сведения об авторе

Галютдинов Заур Рашидович, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, gazr@yandex.ru

Author Details

Zaur R. Galyautdinov, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, gazr@yandex.ru