

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

УДК 624.012.042.8.001.2

*ГАЛЯУТДИНОВ ЗАУР РАШИДОВИЧ, канд. техн. наук, доцент,
gazr@yandex.ru
Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ПОЛОС БЕТОНА МЕЖДУ ТРЕЩИНАМИ ПРИ КРАТКОВРЕМЕННОМ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

При формировании модели динамического деформирования железобетона необходимо учитывать основные факторы, оказывающие влияние на напряженно-деформированное состояние конструкций. Одним из важных параметров, существенно влияющих на общий характер деформирования железобетона, является прочность полос бетона между трещинами. Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о значительном снижении прочности сжато-растянутых полос бетона между трещинами как при статическом, так и при кратковременном динамическом нагружении. При этом прочность зависит от уровня растягивающих деформаций и угла наклона арматурных стержней к направлениям трещин. Полученные автором теоретические и экспериментальные результаты характеризуют прочность полос бетона между трещинами в области статического нагружения. В статье представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований динамической прочности сжато-растянутых дисков между трещинами. Выполнен статистический анализ опытных данных, на основании которого предложены зависимости, характеризующие динамическую прочность полос бетона в зависимости от уровня растягивающих деформаций и угла наклона арматурных стержней к направлениям трещин.

Ключевые слова: скорость деформирования; кратковременная динамическая нагрузка; напряжения; деформации; плоское напряженное состояние; диаграмма деформирования материала.

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

STRENGTH ANALYSIS OF CONCRETE STRIPS BETWEEN CRACKS UNDER DYNAMIC LOAD

The paper deals with the model of dynamic deformation of reinforced concrete which considers basic aspects influencing the stress-strain state of structures. The strength of concrete

strips between cracks is one of the crucial aspects affecting the general strain behavior of reinforced concrete. Experimental results demonstrate significant change in strength of concrete strips between cracks subjected to both compression and tension under static and dynamic loading. In this case, the strength depends on tensile strain level and the slope angle of reinforcing rods in cracking direction. Existing theoretical and experimental studies estimate the strength of concrete strips between cracks under static loading. The paper presents results of experimental and theoretical studies on the dynamic strength of concrete strips between cracks subjected to compression and tension. Experimental data are analyzed statistically; dependencies are suggested for the dynamic strength of concrete strips depending on the tensile strain level and the slope angle of reinforcing rods in cracking direction.

Keywords: strain rate; dynamic load; stress; strain; plane stress condition; deformation diagram.

Воздействие однократных динамических нагрузок аварийного характера на здания и сооружения предъявляют особые требования к обеспечению устойчивости отдельных конструкций и сооружения в целом данному типу воздействий. Достоверность результатов динамического расчета конструкций определяется в первую очередь моделью деформирования железобетона. Современные модели железобетона позволяют учесть основные особенности динамического деформирования бетона и арматуры на всех стадиях работы конструкции [1–5]. Вместе с тем имеется ряд вопросов, требующих дополнительного изучения, особенно в условиях высокоскоростного нагружения.

Известно, что в плосконапряженных железобетонных конструкциях трещины возникают на площадках главных растягивающих напряжений и могут быть косоориентированными по отношению к стержням арматурной сетки. После возникновения трещины бетон не может воспринимать растягивающие усилия в направлении, перпендикулярном направлению трещины, поэтому все растягивающие усилия по этому направлению передаются через арматуру. Усилия в ортогональном направлении воспринимаются полосами бетона между трещинами.

Исследования прочности полос бетона между трещинами при статическом нагружении отражены в работах ряда отечественных и зарубежных авторов [1, 6–9], обзор которых приведен в работе [10]. По результатам экспериментальных исследований рассмотрено влияние уровня деформаций образцов в направлении, перпендикулярном трещине, и угла наклона арматурных стержней к направлениям трещин. Авторами предложены выражения для прочности полос бетона между трещинами при статическом нагружении, учитывающие указанные выше факторы [Там же]. Особенности деформирования полос бетона между трещинами при интенсивном динамическом нагружении до настоящего времени не рассматривались.

В работе представлены результаты экспериментально-теоретического анализа деформирования сжато-растянутых полос бетона между трещинами при кратковременном динамическом нагружении. В исследованиях рассмотрено влияние как уровня деформаций образца перпендикулярно трещине, так и угла наклона арматурных стержней относительно направления трещин. Экспериментальные исследования проводились на железобетонных дисках с фиксированными трещинами. Общее количество испытанных образцов – 72, в том числе: 23 образца при $\alpha = 90^\circ$; 28 – при $\alpha = 45^\circ$ и 21 – при $\alpha = 30^\circ$. Во

всех образцах при бетонировании устанавливали целлулоидные прокладки, на которых в дальнейшем, в процессе испытаний, образовались трещины, разделяющие бетонные блоки. Арматурные стержни располагались под углом к трещине. При этом угол наклона арматурных стержней к трещине α принимался равным 90° , 45° и 30° . В образцах с $\alpha = 30^\circ$ и $\alpha = 45^\circ$ по наружным граням устанавливались металлические пластины (рис. 1, поз. 2), препятствующие взаимному смещению арматурных стержней. Основные размеры и схемы армирования образцов показаны на рис. 1.

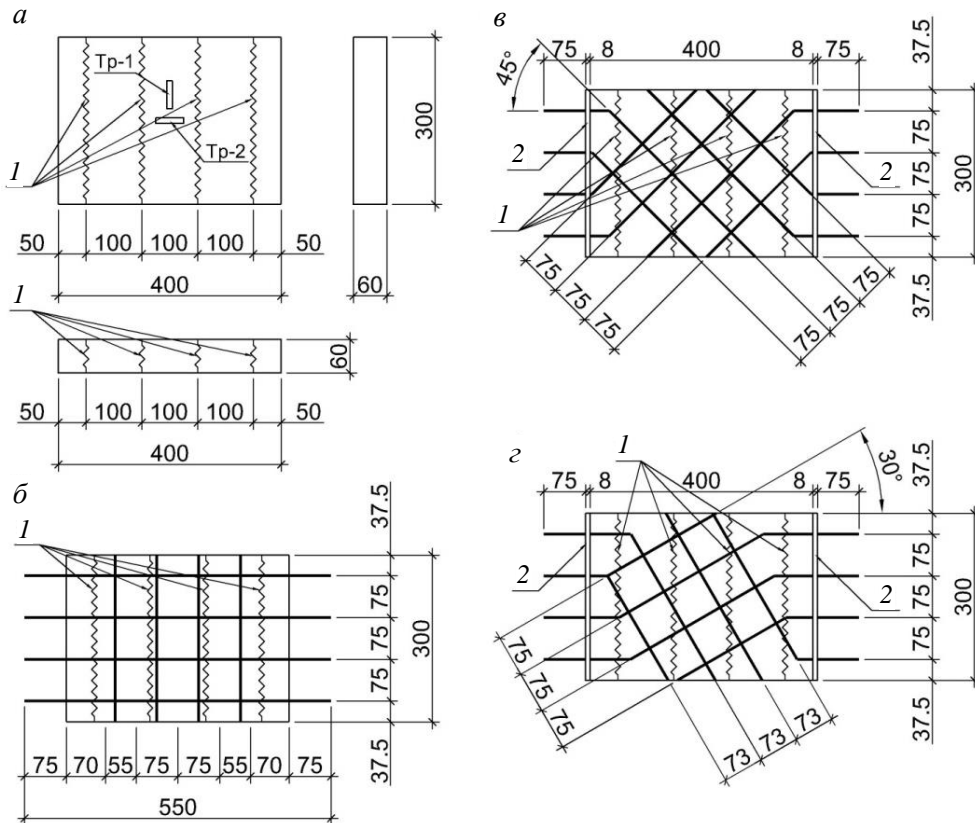


Рис. 1. Общий вид образцов и расстановка тензодатчиков на бетоне (а) и схемы армирования образцов при различных углах наклона арматурных стержней к трещинам (б, в, г):

1 – трещины; 2 – металлические пластины

Все опытные образцы были изготовлены из тяжёлого бетона класса В15. Арматурные сетки выполнены из арматуры класса А400 диаметром 8 мм.

Одновременно с образцами изготавливали 6 контрольных кубов размером ребра 100 мм и 6 призм размерами $100 \times 100 \times 400$ мм для определения прочностных и деформативных характеристик бетона. Все кубы были испытаны статической нагрузкой. Призмы испытывались на действие статической (3 призмы) и кратковременной динамической нагрузки (3 призмы). Динами-

ческие испытания призм проводились при скоростях деформирования $\dot{\epsilon}_b$, близких к скоростям деформирования бетона опытных образцов, что позволило в дальнейшем определить отношение динамической прочности полос бетона между трещинами к динамической прочности стандартных призм.

В процессе испытаний нагрузка на образец прикладывалась в двух взаимно ортогональных направлениях. По одному из направлений образец подвергался растяжению, а по другому – сжатию (рис. 2). Растягивающие напряжения передавались полностью через арматуру. Сжимающие напряжения передавались на бетонные блоки между трещинами (рис. 2). Испытания проводились в два этапа, сначала создавалось растяжение до необходимого уровня, а затем сжатие до разрушения. При растяжении образовались трещины, разделяющие образец на три бетонных блока, связанных между собой арматурой.

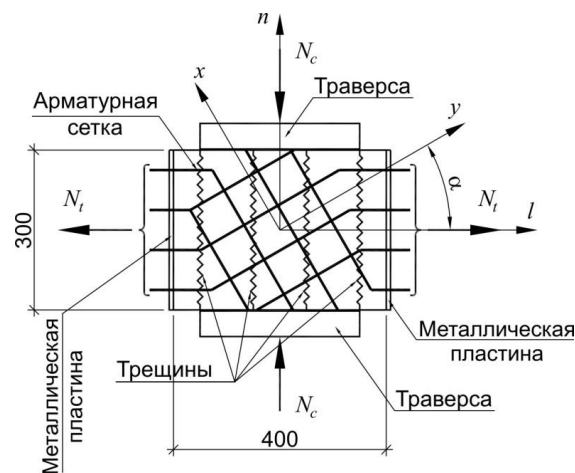


Рис. 2. Схема испытаний образцов

Растягивающая нагрузка на образец создавалась при помощи гидравлического домкрата. Динамические сжимающие напряжения создавались за счет энергии падающего груза. Высота падения груза и его величина подбирались из условия упругопластического деформирования конструкции до полного исчерпания несущей способности при однократном действии нагрузки.

На рис. 3 показаны схемы разрушения образцов с различными углами α . Из рис. 3 видно, что при практически одинаковом уровне растягивающих деформаций ($\epsilon_l = 111,1 \cdot 10^{-5} \dots 184,7 \cdot 10^{-5}$) для образцов с $\alpha = 90^\circ$ разрушение полосы бетона носит локальный характер, в то время как для образцов с $\alpha = 30^\circ$ и $\alpha = 45^\circ$ наблюдается практически полное разрушение бетона полосы. Разрушающая нагрузка для образцов составляет 106,65 кН ($\alpha = 90^\circ$), 102,9 кН ($\alpha = 30^\circ$) и 89,89 кН ($\alpha = 45^\circ$).

На рис. 4 приведены данные по прочности полос бетона между трещинами при различном уровне натяжения образцов ϵ_l для принятых углов наклона арматурных стержней. По результатам исследования видно, что прочность по-

лос бетона между трещинами снижается с увеличением уровня деформаций перпендикулярно трещине ε_l для всех значений угла наклона арматурных стержней к трещине α . При этом для $\alpha = 30^\circ$ и $\alpha = 45^\circ$ наблюдается более значительное снижение прочности. Это обусловлено нарушением структуры бетона и сцепления бетона полосы между трещинами с арматурой при ее растяжении. Чем выше уровень натяжения ε_l , тем в большей степени происходит нарушение структуры материала. При этом для $\alpha = 90^\circ$ в арматурных стержнях возникают только осевые деформации. При $\alpha = 30^\circ$ и $\alpha = 45^\circ$ помимо растяжения стержней происходит деформирование арматурной сетки, что, в свою очередь, приводит к более значительному нарушению структуры бетона. По результатам экспериментальных исследований прочность полос бетона в зависимости от указанных выше факторов снижается до 2...2,5 раза.

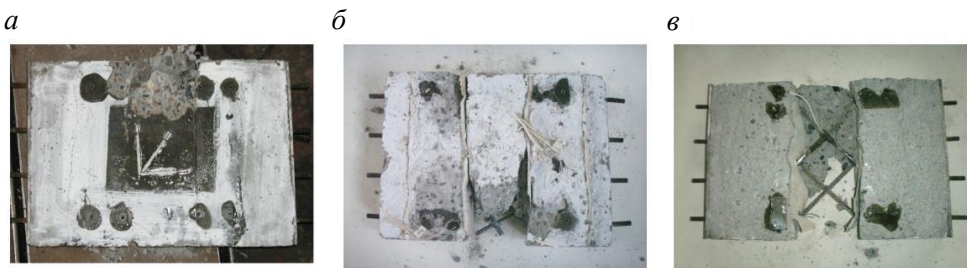


Рис. 3. Схемы разрушения образцов:

a – при $\alpha = 90^\circ$ и $\varepsilon_l = 184,7 \cdot 10^{-5}$; b – при $\alpha = 30^\circ$ и $\varepsilon_l = 152,41 \cdot 10^{-5}$; $в$ – при $\alpha = 45^\circ$ и $\varepsilon_l = 111 \cdot 10^{-5}$

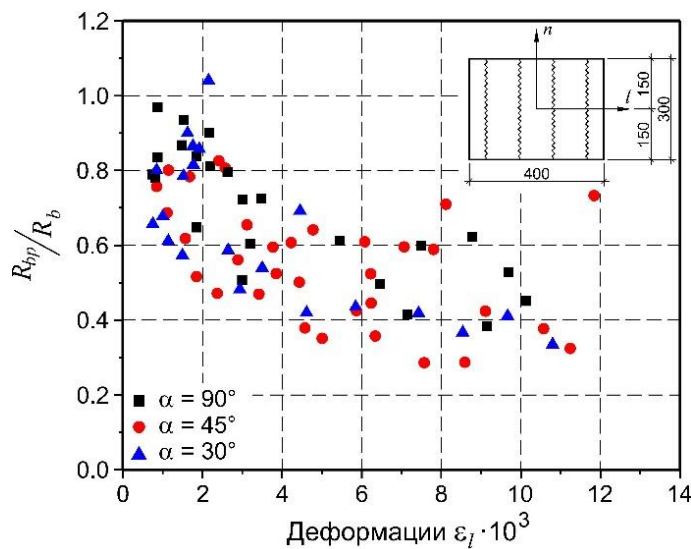


Рис. 4. Изменение прочности полос бетона между трещинами при кратковременном динамическом нагружении в зависимости от угла наклона и уровня деформаций

Экспериментальные исследования прочности полос бетона между трещинами позволили качественно оценить влияние исследуемых факторов. Количественная оценка влияния деформаций ε_l при различных углах наклона стержней α на прочность полос бетона между трещинами выполнена с применением методов математической статистики [11].

Результаты экспериментальных данных свидетельствуют о нелинейном изменении прочности полос бетона в зависимости от уровня деформаций ε_l (рис. 4 и 5, а). Наибольшее снижение прочности наблюдается на начальном этапе при деформациях до $\varepsilon_l = 400 \cdot 10^{-5}$, после чего интенсивность снижения прочности падает. В связи с этим на начальном этапе выполнено преобразование данных к линейному виду, после чего выполнена оценка выборок данных, включающая в себя отсев грубых погрешностей и проверку соответствия распределения прочности полос бетона между трещинами нормальному закону распределения. Результаты для образцов с $\alpha = 30^\circ$ представлены на рис. 5. Отсев грубых погрешностей выполнен с использованием правила Стьюдента. Проверка распределения данных нормальному закону, выполненная на основании критериев Колмогорова – Смирнова и Шапиро – Уилка, показала их соответствие нормальному закону распределения (рис. 5, в, г).

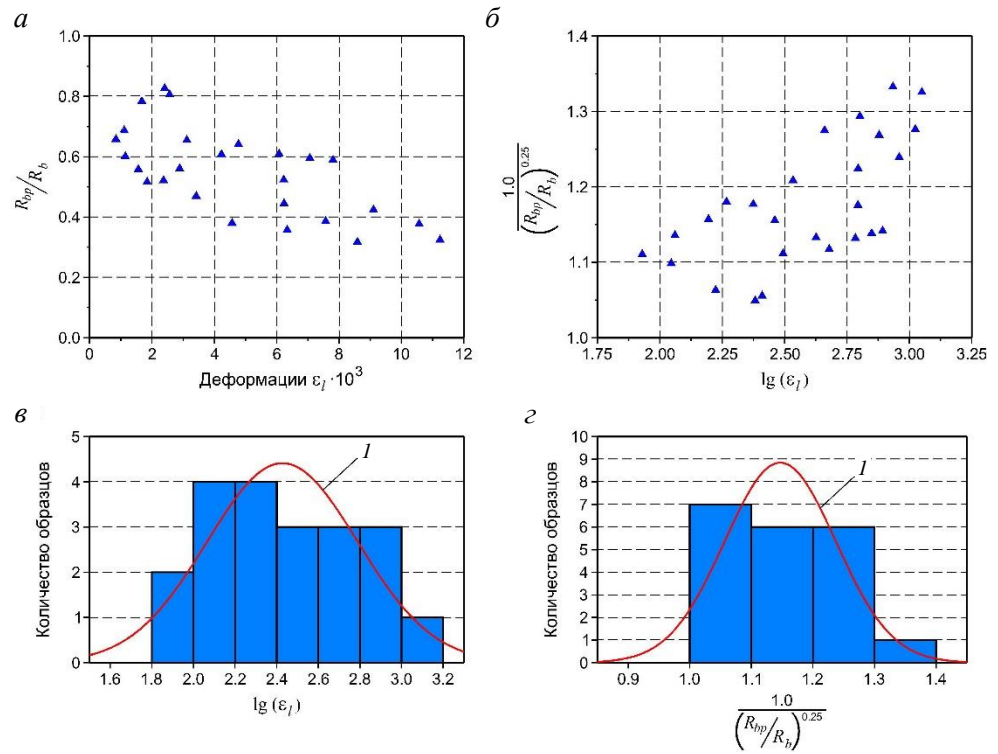


Рис. 5. Изменение прочности полос бетона между трещинами при кратковременном динамическом нагружении при $\alpha = 30^\circ$ (а, б) и опытное и теоретическое распределение рассматриваемых величин после их приведения к линейному виду (в, г): I – нормальное теоретическое распределение

Вычисленные коэффициенты корреляции, характеризующие зависимость прочности и уровня деформаций растяжения ε_l , равны: при $\alpha = 90^\circ$ – 0,804; при $\alpha = 45^\circ$ – 0,652; при $\alpha = 30^\circ$ – 0,811. Это свидетельствует о средней и высокой степени связи исследуемых величин.

Регрессионный анализ выполнен по методике, изложенной в исследованиях [11]. На основе метода наименьших квадратов получены уравнения регрессии, которые с учетом обратного преобразования имеют следующий вид:

при $\alpha = 90^\circ$

$$\frac{R_{bpd}}{R_{bd}} = \frac{1}{(0,7043 + 0,1639 \cdot \lg(\varepsilon_l))^4}; \quad (1)$$

при $\alpha = 45^\circ$

$$\frac{R_{bpd}}{R_{bd}} = \frac{1}{(0,7529 + 0,1639 \cdot \lg(\varepsilon_l))^4}; \quad (2)$$

при $\alpha = 30^\circ$

$$\frac{R_{bpd}}{R_{bd}} = \frac{1}{(0,65595 + 0,2023 \cdot \lg(\varepsilon_l))^4}. \quad (3)$$

Оценка значимости полученных выражений выполнена на основе критерия Фишера, который равен: при $\alpha = 90^\circ$ – $F_{(1, 21)} = 38,523$; при $\alpha = 45^\circ$ – $F_{(1, 24)} = 17,732$; при $\alpha = 30^\circ$ – $F_{(1, 18)} = 34,655$. Полученные значения выше табличных величин, соответствующих 5 % вероятности, соответственно равных $F_{(1, 21)}^T = 4,3248$, $F_{(1, 24)}^T = 4,2597$ и $F_{(1, 18)}^T = 4,4139$ [11]. Таким образом, представленные зависимости позволяют определять динамическую прочность полос бетона между трещинами с доверительной вероятностью 0,95, заложенной в нормативные документы.

Анализ полученных теоретических зависимостей, представленных на рис. 6, показывает, что прочность полос бетона образцов, угол наклона арматурных стержней которых составляет $\alpha = 30^\circ$ и $\alpha = 45^\circ$, значительно ниже прочности при $\alpha = 90^\circ$. При этом для образцов с $\alpha = 30^\circ$ и $\alpha = 45^\circ$ значения прочности сопоставимы. Данный характер изменения прочности полос бетона обусловлен наличием дополнительных напряжений в бетоне образцов с $\alpha = 30^\circ$ и $\alpha = 45^\circ$, возникающих при деформировании арматурной сетки, чего не происходит в образцах с $\alpha = 90^\circ$.

Таким образом, по результатам экспериментально-теоретических исследований показано значительное влияние уровня деформаций образцов в направлении, перпендикулярном трещине ε_l , и угла наклона арматурных стержней к направлениям трещин α на прочность полос бетона между трещинами. При этом для элементов с углами α , отличными от 90° , наблюдается более значительное снижение прочности полос бетона по сравнению с элементами при $\alpha = 90^\circ$ во всем диапазоне деформаций растяжения ε_l .

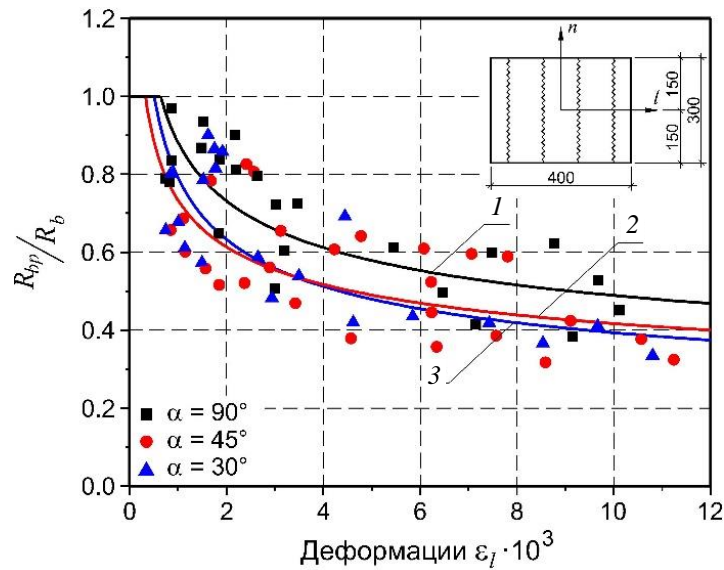


Рис. 6. Экспериментальное и теоретическое изменение прочности полос бетона между трещинами при кратковременном динамическом нагружении:
1 – по формуле (1); 2 – по формуле (2); 3 – по формуле (3); ■, ●, ▲ – экспериментальные данные

На основе обработки результатов экспериментальных исследований предложены зависимости для определения прочности полос бетона между трещинами. Оценка приведенных выражений свидетельствует о достаточной надежности вычисленных значений прочности полос бетона.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карпенко, Н.И. Общие модели механики железобетона / Н.И. Карпенко. – М. : Стройиздат, 1996. – 416 с.
2. Карпенко, Н.И. К построению обобщенной расчетной модели многослойной анизотропной пластинки / Н.И. Карпенко // Строительная механика и расчет сооружений. – 1984. – № 1. – С. 28–32.
3. Finite difference analysis of simply supported RC slabs for blast loadings / J. Jones, C. Wua, D.J. Oehlers, A.S. Whittaker, W. Sunc, S. Marksa, R. Coppola // Engineering Structures. – 2009. – № 31. – P. 2825–2832.
4. Experimental analysis and modeling of two-way reinforced concrete slabs over different kinds of yielding supports under short-term dynamic loading / B. Chiaia, O. Kumpyak, L. Placidi, V. Maksimov // Engineering Structures. – 2015. – № 96. – P. 88–99.
5. Галяутдинов, З.Р. Многослойная модель деформирования железобетона в динамических расчетах плит, опертых по контуру / З.Р. Галяутдинов // Известия вузов. Строительство. – 2010. – №10. – С. 93–98.
6. Яременко, А.Ф. Прикладная теория длительного деформирования и сопротивления плоских железобетонных элементов : дис. ... докт. техн. наук. – Одесса, 1987. – 500 с.
7. Belarbi, A. Constitutive laws of reinforced concrete membrane elements / A. Belarbi, L.-X. Zhang, T.T.C. Hsu // Sociedad Mexicana de Ingenieria Sismica in World Conference On Earthquake Engineering. – 1996. – P. 1–8.
8. Bahn, B.Y. Stress-strain behavior of concrete under cyclic loading / B.Y. Bahn, T.T.C. Hsu // ACI Structural Journal. – 1998. – V. 95. – № 2. – P. 178–193.

9. Vecchio, F.J. The modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear / F.J. Vecchio, M.P. Collins // *ACI Journal*. – 1986. – V. 83. – № 2. – P. 219–231.
10. Кумпяк, О.Г. Прочность и деформативность железобетонных конструкций на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении / О.Г. Кумпяк, З.Р. Галяутдинов, Д.Н. Кокорин. – Томск : Изд-во ТГАСУ, 2016. – 270 с.
11. Львовский, Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул / Е.Н. Львовский. – М. : Высшая школа, 1988. – 239 с.

REFERENCES

1. Karpenko N.I. Obshhie modeli mehaniki zhelezobetona [General models of reinforced concrete mechanics]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1996. 416 p. (rus)
2. Karpenko N.I. K postroyeniyu obobshchennoy raschetnoy modeli mnogosloynnoy anizotropnoy plastinki [Generalized computational model of multilayer anisotropic plate]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii*. 1984. No. 1. Pp. 28–32. (rus)
3. Jones J., Wua C., Oehlers D.J., Whittaker A.S., Sunc W., Marksa S., Coppola R. Finite difference analysis of simply supported RC slabs for blast loadings. *Engineering Structures*. 2009. No. 31. Pp. 2825–2832.
4. Chiaia B., Kumpyak O., Placidi L., Maksimov V. Experimental analysis and modeling of two-way reinforced concrete slabs over different kinds of yielding supports under short-term dynamic loading. *Engineering Structures*. 2015. No. 96. Pp. 88–99.
5. Galyautdinov Z.R. Mnogosloynnaya model' deformirovaniya zhelezobetona v dinamicheskikh raschetakh plit, opertykh po konturu [Multilayer model of reinforced concrete deformation in dynamic calculations of plates supported along four sides]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 2010. No. 10. P. 93–98. (rus)
6. Yaremenko A.F. Prikladnaya teoriya dlitel'nogo deformirovaniya i soprotivleniya ploskikh zhelezobetonnykh elementov [Applied theory of long-term deformation and resistance of flat reinforced concrete elements]. DSc Thesis. Odessa, 1987. 500 p. (rus)
7. Belarbi A., Zhang L.-X., Hsu T.T.C. Constitutive laws of reinforced concrete membrane elements. *Sociedad Mexicana de Ingenieria Sismica in World Conference on Earthquake Engineering*. 1996. Pp. 1–8.
8. Bahn B.Y., Hsu T.T.C. Stress-strain behavior of concrete under cyclic loading. *ACI Structural Journal*. 1998. V. 95. No. 2. Pp. 178–193.
9. Vecchio F.J., Collins M.P. The modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear. *ACI Journal*. 1986. V. 83. No. 2. Pp. 219–231.
10. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Kokorin D.N. Prochnost' i deformativnost' zhelezobetonnykh konstrukcij na podatlivykh oporah pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhении [Strength and deformability of reinforced concrete structures on yielding supports under dynamic load]. Tomsk: TSUAB Publ., 2016. 270 p. (rus)
11. L'vovskiy E.N. Statisticheskie metody postroeniya empiricheskikh formul [Statistical methods of empirical formulas]. Moscow: Vysshaya Shkola Publ., 1988. 239 p. (rus)