

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

УДК 624.073.121+624.042.3

КУМПЯК ОЛЕГ ГРИГОРЬЕВИЧ, докт. техн. наук, профессор,

ogkumpyak@yandex.ru

ГАЛЯУТДИНОВ ЗАУР РАШИДОВИЧ, канд. техн. наук, доцент,

zaurg@sibmail.com

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ НА ПОДАТЛИВЫХ ОПОРАХ

В работе приведены результаты теоретических исследований опертых по контуру железобетонных плит на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении. Выполненные исследования позволяют оценить степень влияния жесткости податливых опор, стадии их деформирования, характера распределения жесткостей по периметру плиты и уровня деформаций податливых опор в момент перехода в стадию пластического деформирования на работу опертых по контуру железобетонных плит. По результатам выполненных расчетов выявлены физико-механические параметры опор, позволяющие получить максимальный эффект, связанный со снижением параметров напряженно-деформированного состояния конструкций.

Ключевые слова: железобетонная плита; метод конечных элементов; многослойная модель; податливая опора; жесткость податливых опор; упругая стадия; упругопластическая стадия; стадия отвердения.

OLEG G. KUMPYAK, DSc, Professor,

ogkumpyak@yandex.ru

ZAUR R. GALJAUTDINOV, PhD, A/Professor,

zaurg@sibmail.com

*Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia*

DYNAMIC DEFORMATION OF REINFORCED CONCRETE SLABS ON YIELDING SUPPORTS

The results of theoretical research of reinforced concrete slabs supported along four sides on yielding supports under the dynamic loading are presented in this paper. The research allows estimating the degree of rigidity of yielding supports, deformation stages, rigidity distribution by the plate perimeter and the level of deformations of yielding supports during the transition to

the plate perimeter and the level of deformations of yielding supports during the transition to plastic deformation that influence the behavior of reinforced concrete slabs. The results of calculations allow the detection of mechanical-and-physical properties of supports and, thereby, achieving the maximum effect from the decrease in stress-strain state parameters of the structure.

Keywords: reinforced concrete slab; finite element method; multi-layer model; yielding support; yielding support rigidity; elastic stage; elastoplastic stage; hardening stage.

В последние годы наблюдается увеличение вероятности особых взрывных воздействий на конструкции зданий и сооружений. Возникающие при этом динамические нагрузки характеризуются малым временем действия и высокой интенсивностью и способны приводить к значительным повреждениям конструкций и даже полному разрушению зданий и сооружений, нанося при этом значительный социально-экономический ущерб. Особые динамические нагрузки относятся к однократным и характеризуются малой вероятностью возникновения, при этом конструкции зданий и сооружений, подверженные указанным воздействиям, проектируются из условия полного восприятия действующей аварийной нагрузки. В настоящее время для обеспечения необходимого уровня сопротивления конструкций при интенсивных динамических воздействиях все более широкое применение получают активные способы защиты, к которым относятся различные виды сейсмоизолирующих опор, применяемых при сейсмических воздействиях, виброизоляторы, используемые при действии динамических нагрузок периодического характера, и др. В случае воздействия особых динамических нагрузок применение активных способов защиты в виде податливых опор позволяет повысить энергоемкость системы «опора – конструкция» и снизить интенсивность динамического воздействия [9, 10].

Экспериментальные исследования железобетонных балок [3, 7, 8] и опертых по контуру плит [5, 6, 11] на податливых опорах свидетельствуют о высокой эффективности их применения при интенсивном динамическом нагружении. Полученные опытные данные показали, что эффективность применения податливых опор во многом определяется стадией их деформирования, при этом наибольший эффект достигается при работе опор в пластической стадии.

Теоретические исследования балок [1] и плит [4] на податливых опорах позволили более детально оценить степень влияния жесткости опор и стадии их работы на деформации конструкций. В работе [1] показано, что в статически определимых конструкциях, таких как однопролетная шарнирно опертая балка, деформирование опор только в упругой стадии отрицательно влияет на работу конструкции. Наибольший эффект, связанный со снижением параметров напряженно-деформированного состояния, достигается при использовании податливых опор, работающих в упругопластической стадии без перехода в стадию отвердения. При переходе в стадию отвердения происходит резкое увеличение прогибов конструкции, обусловленное торможением движущейся конструкции на опорах [Там же]. Расчет опертых по контуру плит показал, что так же, как и для статически определимых балок, деформирование опор в упругой стадии оказывает отрицательное влияние на работу опертых по контуру плит, а упругопластическое деформирование опор приводит к сниже-

нию динамической реакции системы. Вместе с тем, в отличие от балок, переход опор в стадию отвердения не ведет к резкому росту перемещений, что обусловлено неравномерным распределением опорной реакции по периметру плиты и статической неопределимостью конструкции [4].

В исследованиях [4] рассмотрена работа плиты в упругой стадии, а работа опор – в упругой, пластической стадии и стадии отвердения. Упруго-пластические деформации конструкции не учитывались. В настоящей работе приведены результаты численного анализа опертых по контуру железобетонных плит при кратковременном динамическом нагружении. При этом учитывается упругопластическое деформирование плиты при различных стадиях деформирования опор.

Аппроксимация конструкции осуществлялась плоскими четырехузловыми конечными элементами плит с тремя степенями свободы в узле Z , UX , UY (рис. 1, *а*). Метод расчета реализован на основе многослойной модели [2], описывающей сопротивление сечения в целом, а особенности нелинейного деформирования бетона и арматуры учитываются в пределах отдельного слоя посредством диаграмм деформирования материалов.

Диаграмма деформирования бетона, учитывающая ниспадающую ветвь, скорость деформирования, влияние косвенного армирования на его прочностные и деформативные свойства, принята согласно исследованиям W.H. Dilger, R. Koch, R. Kowalczyk [12]. Для арматурной стали диаграмма сопротивления принята в виде кусочно-линейной аппроксимации, отражающей ее работу в упругой и пластической стадиях и в стадии упрочнения [2].

Учет податливости опор выполнен при помощи специальных конечных элементов, продольная жесткость которых может меняться по нелинейному закону. Данные конечные элементы устанавливаются в узлах с податливой связью по направлениям степеней свободы. При расчете диаграмма деформирования податливой опоры принята кусочно-линейной (рис. 1, *в*) в соответствии с реальным характером деформирования сминаемых вставок [6].

Уравнение движения системы представлено в приращениях

$$[M]\{\Delta \ddot{u}\} + [K]\{\Delta u\} = \{\Delta P(t)\},$$

где $[K]$, $[M]$ – матрицы жесткости и масс системы на i -м этапе счета; $\{\Delta P(t)\}$ – приращение вектора нагрузки на i -м этапе счета; $\{\Delta u\}$, $\{\Delta \ddot{u}\}$ – векторы приращений перемещений и ускорений на i -м этапе счета.

Процедура итерационного расчета разработана на основе метода Newmark-β. Расчет ведется поэтапно с корректировкой жесткости для каждого элемента на очередном шаге счета по времени путем изменения модуля упругости арматуры и секущего модуля упругости бетона в соответствии с диаграммами $\sigma - \epsilon$ и условиями работы материала. Одновременно в процессе счета на каждом этапе отслеживается состояние податливой опоры. При превышении предельной деформации сминаемой вставки, соответствующей определенной стадии, происходит переход к следующей стадии деформирования податливой опоры (упругопластической или стадии отвердения), сопровождающийся изменением жесткостных параметров податливой опоры в расчетной схеме.

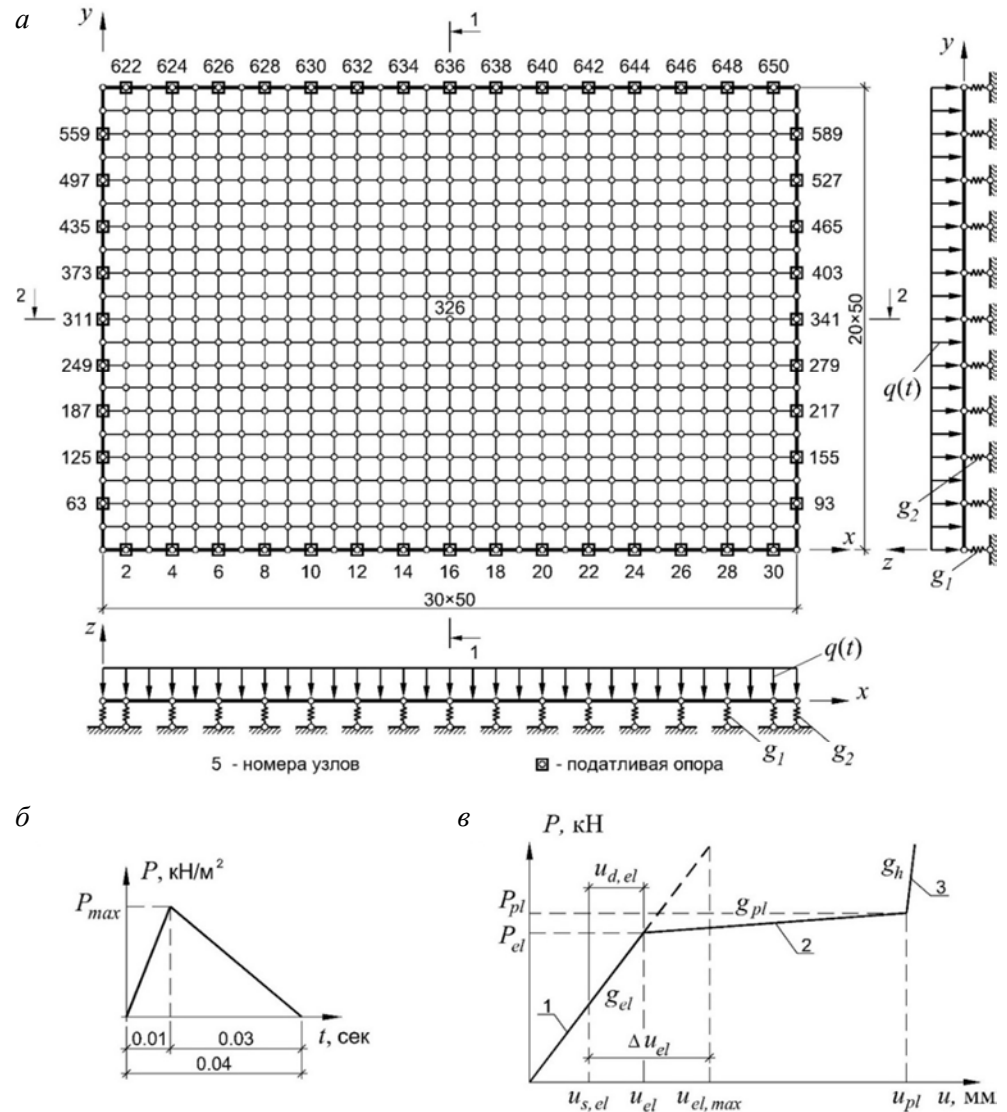


Рис. 1. Схема разбиения плиты на конечные элементы (а), закон изменения нагрузки, принятый в численных расчетах (б), и диаграмма деформирования податливых опор (в):

1 – упругая стадия деформирования опоры; 2 – упругопластическая стадия деформирования опоры; 3 – стадия отвердения

Погонная жесткость податливых опор в упругой стадии работы варьировалась в пределах $g_{el} = 10\,000\text{--}200\,000$ кН/м. В пластической стадии жесткость опор принималась равной 5 % от жесткости опоры в упругой стадии, что соответствует результатам экспериментальных исследований податливых опор [7]. Количественная оценка влияния податливости опор выполнена по перемещениям в середине плиты (узел 326, рис. 1, а), при этом рассмотрены два сечения (1–1 и 2–2 на рис. 1, а).

В исследованиях рассмотрены два варианта распределения жесткости податливых опор по периметру плиты – $g_{el1}/g_{el2} = 4$ и нелинейное синусоидальное распределение жесткости вдоль сторон плиты. Здесь g_{el1} и g_{el2} – жесткость податливых опор в упругой стадии вдоль длинной и короткой сторон плиты соответственно.

Анализ деформирования опертых по контуру железобетонных плит свидетельствует о значительном влиянии жесткости податливых опор на напряженно-деформированное состояние конструкций. При малой жесткости опор их деформации, при действии динамической нагрузки, значительно выше, чем деформации конструкции (рис. 2, а). То есть поглощение энергии внешнего воздействия в основном происходит за счет деформирования податливых опор, при этом деформации конструкции малы. Период колебаний конструкции увеличивается, перемещения не превышают прогибов плит на жестких опорах. Также необходимо отметить, что интенсивное развитие перемещений плиты начинается с некоторым сдвигом во времени по отношению к деформированию податливых опор.

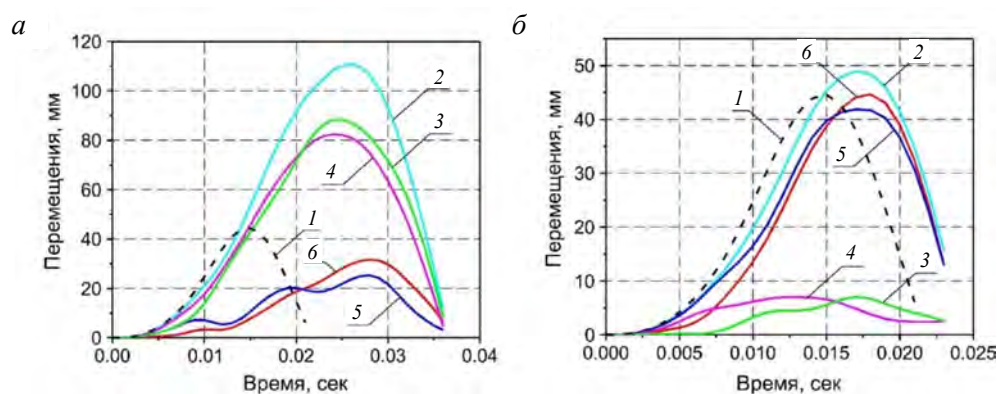


Рис. 2. Изменение перемещений во времени железобетонных плит на жестких и податливых опорах ($g_{el1}/g_{el2} = 4$):

а – при $g_{el1} = 10\,000$ кН/м/м; б – $g_{el1} = 200\,000$ кН/м/м; 1 – перемещения в центре плиты на жестких опорах; 2 – полные перемещения в центре плиты на податливых опорах; 3 – перемещения опоры (узел 16 рис. 1, а); 4 – перемещения опоры (узел 311 рис. 1, а); 5 – максимальные перемещения плиты в сечении 1–1 без учета деформаций опор; 6 – максимальные перемещения плиты в сечении 2–2 без учета деформаций опор

Увеличение жесткости податливых опор приводит к перераспределению между деформациями опор и конструкции. Перемещения плит на податливых опорах большой жесткости значительно выше деформаций опор (рис. 2, б). Деформирование конструкций и опор начинается практически одновременно, период колебаний и перемещения конструкций на податливых и жестких опорах близки.

Влияние характера распределения жесткостей податливых опор по периметру плиты и стадии работы опоры (упругая и упругопластическая) приведено

на рис. 3. При деформировании опор только в упругой стадии, независимо от характера распределения их жесткостей по периметру плит, в целом наблюдается отрицательное влияние податливости на работу конструкции, которое выражается в превышении перемещений плит на упругих податливых опорах относительно плит на жестких опорах. Вместе с тем при $g_{el1}/g_{el2} = 4$ и $g_{el1} = 10000$ кН/м/м наблюдается незначительный положительный эффект (рис. 3, а).

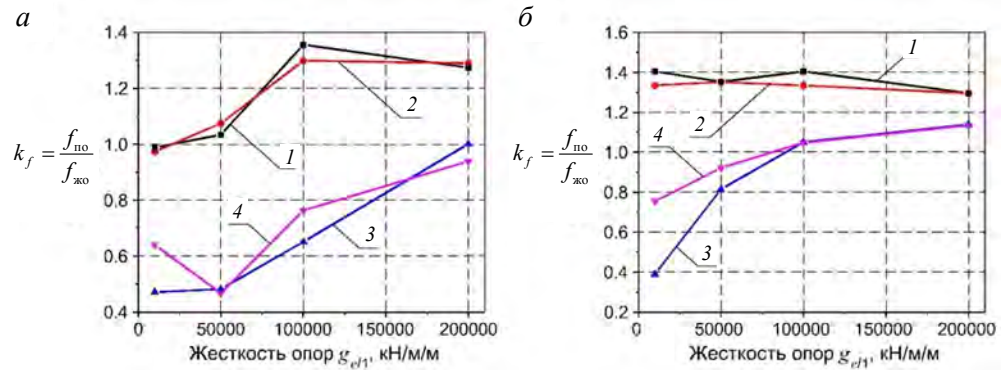


Рис. 3. Влияние податливости опор на максимальный прогиб плиты при $g_{el1}/g_{el2} = 4$ (а) и нелинейном распределении жесткости опор (б):

1 – в сечении 2–2 при упругом деформировании опор; 2 – в сечении 1–1 при упругом деформировании опор; 3 – в сечении 2–2 при упругопластическом деформировании опор; 4 – в сечении 1–1 при упругопластическом деформировании опор

При деформировании опор в упругопластической стадии без перехода в стадию отвердения снижение перемещений плит может составлять свыше 50 %. При этом наиболее эффективным является вариант при $g_{el1}/g_{el2} = 4$, для которого наблюдается снижение перемещений плит во всем диапазоне исследуемых жесткостей податливых опор. При нелинейном распределении жесткостей опор положительный эффект наблюдается лишь при низких значениях жесткостей опор ($g_{el1} \leq 5000$ кН/м/м).

Переход опор в стадию отвердения для плит, деформирующихся в упругопластической стадии, сопровождается ростом перемещений, обусловленным, как и в балках [1], торможением конструкции на опорах. Таким образом, переход опор в стадию отвердения снижает эффективность применения податливых опор.

Выполненные расчеты также показали, что деформации конструкции определяются уровнем упругих перемещений опоры u_{el} , после достижения которых происходит переход опоры в пластическую стадию деформирования. На рис. 1, в показана схема деформирования податливой опоры. При действии проектной статической нагрузки податливая опора получает перемещение $u_{s,el}$. В результате аварийного динамического воздействия опора получает дополнительное приращение перемещений $u_{d,el}$, после чего податливая опора

переходит в пластическую стадию деформирования. При этом суммарное перемещение опоры в упругой стадии не превышает предельного значения $u_{s,el} + u_{d,el} < u_{el,max}$, где $u_{el,max}$ – максимальные упругие деформации податливой опоры, при условии ее деформирования только в упругой стадии, для заданного закона изменения нагрузки во времени. Допустимый интервал изменения упругих перемещений опоры при динамическом воздействии равен $\Delta u_{el} < u_{el,max} - u_{s,el}$.

Полученные результаты показывают, что наибольшее снижение перемещений достигается при $0,4 \Delta u_{el} < u_{el} < 0,8 \Delta u_{el}$ (рис. 4). При большем или меньшем значении эффективность применения податливых опор значительно снижается или вовсе оказывается отрицательной. Эффективность податливых опор снижается с ростом жесткости опор независимо от характера распределения жесткостей.

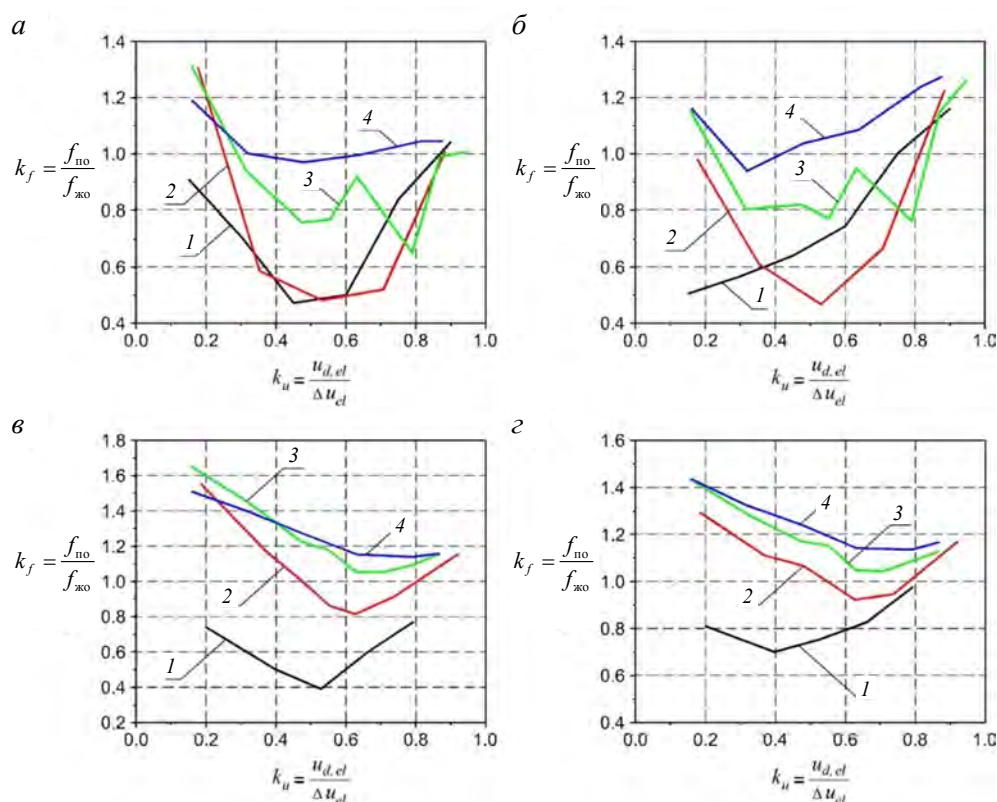


Рис. 4. Влияние величины перемещений при переходе опор в пластическую стадию на перемещения плит:

а – в сечении 2–2 при $g_{el1}/g_{el2} = 4$; б – в сечении 1–1 при $g_{el1}/g_{el2} = 4$; в – в сечении 2–2 при нелинейном распределении жесткости опор по сторонам плиты; г – в сечении 1–1 при нелинейном распределении жесткости опор по сторонам плиты; 1 – при $g_{el1} = 10\,000$ кН/м/м; 2 – при $g_{el1} = 50\,000$ кН/м/м; 3 – при $g_{el1} = 100\,000$ кН/м/м; 4 – при $g_{el1} = 200\,000$ кН/м/м

Таким образом, по результатам исследований можно отметить, что эффективность применения податливых опор зависит от соотношения жесткости конструкции и податливых опор, стадии их деформирования, характера распределения жесткостей опор по периметру плиты и уровня деформаций податливых опор в момент перехода в стадию пластического деформирования. Анализ полученных результатов показал, что деформирование податливых опор только в упругой стадии отрицательно влияет на работу опертых по контуру плит независимо от характера распределения жесткостей опор по периметру. Наибольший эффект, связанный со снижением параметров напряженно-деформированного состояния, достигается в плитах с распределением жесткостей податливых опор $g_{el1}/g_{el2} = 4$ при использовании податливых опор, работающих только в упругопластической стадии без перехода в стадию отвердения и при $0,4\Delta u_{el} < u_{el} < 0,8\Delta u_{el}$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кумпяк, О.Г. Деформирование железобетонных балок на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении / О.Г. Кумпяк, З.Р. Галяутдинов // Современные проблемы строительных материалов, конструкций, механики грунтов и сложных реологических систем : материалы Международной научно-технической конференции (19–20 апреля 2013 г.) / Самаркандский гос. архит.-строит. институт. – Самарканд, 2013. – С. 31–35.
2. Кумпяк, О.Г. Расчет железобетонных плит на кратковременные динамические нагрузки с учетом реальных свойств материалов / О.Г. Кумпяк, З.Р. Галяутдинов // Бетон и железобетон. – 2007. – № 6. – С. 15–19.
3. Кумпяк, О.Г. Экспериментально-теоретические исследования железобетонных балок на податливых опорах по наклонным сечениям при сейсмических и других динамических нагружениях / О.Г. Кумпяк, З.Р. Галяутдинов, Д.Н. Кокорин // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2013. – № 1. – С. 40–45.
4. Прочность и деформативность железобетонных балок и плит на податливых опорах при интенсивном динамическом нагружении / О.Г. Кумпяк, З.Р. Галяутдинов, Д.Н. Кокорин, В.Б. Максимов // Бетон и железобетон – взгляд в будущее : научные труды III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону (Москва, 12–16 мая 2014 г.) : в 7 т. Т. 1. Теория железобетона. Железобетонные конструкции. Расчет и конструирование. – М. : МГСУ, 2014. – С. 315–325.
5. Кумпяк, О.Г. Железобетонные плиты на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении / О.Г. Кумпяк, З.Р. Галяутдинов, В.Б. Максимов // Бетон и железобетон. – 2014. – № 5. – С. 16–19.
6. Кумпяк, О.Г. Исследование железобетонных плит, опертых по контуру на жесткие и податливые опоры, при кратковременном динамическом нагружении / О.Г. Кумпяк, З.Р. Галяутдинов, В.Б. Максимов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2013. – № 1. – С. 69–76.
7. Кумпяк, О.Г. Экспериментальные исследования железобетонных балок по наклонным сечениям при кратковременном динамическом нагружении / О.Г. Кумпяк, Д.Н. Кокорин // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2011. – № 1. – С. 116–129.
8. Кумпяк, О.Г. Экспериментально-теоретическое исследование сжатых железобетонных балок на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении / О.Г. Кумпяк, А.П. Малиновский, А.В. Педиков // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2006. – № 2. – С. 110–114.
9. Расторгуев, Б.С. Прочность железобетонных конструкций зданий взрывоопасных производств и специальных сооружений, подверженных кратковременным динамическим воздействиям : автореф. дис. ... докт. техн. наук. – М., 1987. – 37 с.
10. Саид, А.-Р.А. Повышение несущей способности железобетонных конструкций при взрывных воздействиях : дис. ... канд. техн. наук. – М., 1995. – 207 с.

11. *Experimental analysis and modeling of two-way reinforced concrete slabs over different kinds of yielding supports under short-term dynamic loading* / B. Chiaia, O.G. Kumpyak, L. Placidi, V.B. Maksimov // *Engineering Structures*. – 2015. – V. 96. – P. 88–99.
12. *Dilger, W.H. Ductility of Plain and Confined Concrete under Different Strain Rates* / W.H. Dilger, R. Koch, R. Kowalczyk // *J. of the American Concrete Institute*. – 1984. – V. 81. – № 1. – P. 73–81.

REFERENCES

1. *Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R. Deformirovanie zhelezobetonnykh balok na podatlivykh oporakh pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhении* [Deformation of reinforced concrete beams with yielding supports under dynamic loading]. *Proc. Sci. Conf. 'Modern Problems of Construction Materials, Structures, Terramechanics, and Difficult Rheological Systems'*. SGASU : Publ., Samarkand, 2013. Pp. 31–35. (rus)
2. *Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R. Raschet zhelezobetonnykh плит na kratkovremennye dinamicheskie nagruzki s uchetom real'nykh svoystv materialov* [Dynamic load analysis of reinforced concrete slabs accounting for real properties of materials]. *Beton i zhelezobeton*. 2007. No. 6. Pp. 15–19. (rus)
3. *Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Kokorin D.N. Eksperimental'no-teoreticheskie issledovaniya zhelezobetonnykh balok na podatlivykh oporakh po naklonnym secheniyam pri seismicheskikh i drugikh dinamicheskikh nagruzheni-yakh* [Experimental and theoretical research of reinforced concrete beams on yielding supports under seismic and other dynamic loads]. *Seismostoikeye stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii*. Moscow, 2013. No. 1. Pp. 40–45. (rus)
4. *Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Kokorin D.N., Maksimov V.B. Prochnost' i de-formativnost' zhelezobetonnykh balok i плит na podatlivykh oporakh pri intensivnom dinamicheskom nagruzhении* [Strength and deformability of reinforced concrete beams and slabs on yielding supports under intensive dynamic loading]. *Proc. 3rd All-Rus. (2nd Int.) Conf. on concrete and reinforced concrete. In 7 vol. Teoriya zhelezobetona. Zhelezobetonnye konstruksii. Raschet i konstruirovaniye*. Moscow : MSUCE Publ., 2014. V. 1. Pp. 315–325. (rus)
5. *Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Maksimov V.B. Zhelezobetonnye plity na podatlivykh oporakh pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhении* [Reinforced concrete slabs on yielding supports under dynamic load]. *Beton i zhelezobeton*. 2014. No. 5. Pp. 16–19. (rus)
6. *Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Maksimov V.B. Issledovanie zhelezobetonnykh плит, opertykh po konturu na zhestkie i podatlivye opory, pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhении* [The analysis of two-way reinforced concrete slabs on rigid and yielding supports at short-term dynamic loading]. *Vestnik TSUAB*. Tomsk, 2013. No. 1. Pp. 69–76. (rus)
7. *Kumpyak O.G., Kokorin D.N. Jeksperimental'nye issledovaniya zhelezobetonnykh balok po naklonnym secheniyam pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhении* [Experimental research of reinforced concrete slabs by oblique sections under dynamic load]. *Vestnik TSUAB*. 2011. No. 1. Pp. 116–129. (rus)
8. *Kumpyak O.G., Malinovskii A.P., Pedikov A.V. Eksperimental'no-teoreticheskoe issledovanie szhatykh zhelezobetonnykh balok na podatlivykh oporakh pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhении* [Experimental and theoretical research of compressed reinforced concrete beams on yielding supports under dynamic load]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. Tomsk, 2006. No. 2. Pp. 110–114. (rus)
9. *Rastorguev B.S. Prochnost' zhelezobetonnykh konstruksii zdaniy vzryvoopasnykh proizvodstv i spetsial'nykh sooruzhenii, podverzhennykh kratkovremennym dinamicheskim vozdеistviyam* : avtoref. dis. ... dokt. tekhn. nauk [Durability of reinforced concrete building structures under dynamic loads. DSc Abstract]. Moscow, 1987. 37 p. (rus)
10. *Said A.-R.A. Povyshenie nesushchei sposobnosti zhelezobetonnykh konstruksii pri vzryvnykh vozdеistviyakh* : dis. ... kand. tekhn. nauk [Increase of load-bearing capacity of concrete structures under impact loads. PhD Thesis]. Moscow, 1995. 207 p. (rus)
11. *Chiaia B., Kumpyak O.G., Placidi L., Maksimov V.B. Experimental analysis and modeling of two-way reinforced concrete slabs over different kinds of yielding supports under short-term dynamic loading*. *Engineering Structures*. 2015. V. 96. Pp. 88–99.
12. *Dilger W.H., Koch R., Kowalczyk R. Ductility of plain and confined concrete under different strain rates*. *J. American Concrete Institute*. 1984. V. 81. No. 1. Pp. 73–81.