

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

УДК 624.012.042.8.001.2

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-3-109-117

Г.И. ОДНОКОПЫЛОВ¹, З.Р. ГАЛЯУТДИНОВ², В.Б. МАКСИМОВ³,

¹Национальный исследовательский

Томский политехнический университет,

²Томский государственный архитектурно-строительный университет,

³Международный телематический университет УНИНЕТТУНО

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ НА ПОДАТЛИВЫХ ОПОРАХ ПРИ КРАТКОВРЕМЕННОМ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Представлены результаты экспериментальных исследований прочности и деформативности железобетонных плит, опертых по контуру на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении. В качестве податливых опор рассмотрены сминаемые вставки кольцевого сечения, деформирующиеся в упругой стадии, пластической и стадии отвердения.

Выполнена оценка изменения перемещений, скоростей и ускорений в зависимости от стадии деформирования податливых опор.

По результатам выполненных исследований железобетонных плит показана высокая эффективность применения податливых опор рассматриваемого типа. Применение податливых опор привело к значительному снижению перемещений конструкции и, соответственно, усилий и напряжений.

Ключевые слова: железобетонные плиты; опертые по контуру; кратковременная динамическая нагрузка; податливая опора; упругая стадия; упругопластическая стадия; стадия отвердения; перемещение; скорость; ускорение; испытания.

Для цитирования: Однокопылов Г.И., Галяутдинов З.Р., Максимов В.Б. Экспериментальные исследования железобетонных плит на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 3. С. 109–117.

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-3-109-117

G.I. ODNOKOPYLOV¹, Z.R. GALYAUTDINOV², V.B. MAKSIMOV³,

¹National Research Tomsk Polytechnic University,

²Tomsk State University of Architecture and Building,

³International Telematic University UNINETTUNO

REINFORCED CONCRETE SLABS ON YIELDING SUPPORTS UNDER DYNAMIC LOAD

The paper presents the experimental results of strength and deformability of reinforced concrete slabs on yielding supports arranged along the perimeter under the dynamic loading. Crushable ring-shaped inserts deforming at the elastic, plastic and curing stages are considered as yielding supports. The displacement, velocity and acceleration are evaluated depending on the deformation stage of yielding supports. The high efficiency is shown for the use of yielding supports, which leads to a significant reduction in the structure displacement, strain, and stress.

Keywords: reinforced concrete slabs; dynamic load; yielding support; elastic stage; elastoplastic stage; hardening; moving; speed; acceleration; testing.

For citation: Odnokopylov G.I., Galyautdinov Z.R., Maksimov V.B. Eksperimental'nye issledovaniya zhelezobetonnykh plit na podatlivykh oporakh pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhении [Reinforced concrete slabs on yielding supports under dynamic load]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2021. V. 23. No. 3. Pp. 109–117.

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-3-109-117

Кратковременные динамические нагрузки, возникающие при взрывных воздействиях различного рода (детонация газо-, паро-, пылевоздушных смесей, воздействие средств поражения), могут приводить к разрушению несущих конструкций, крупному материальному ущербу и гибели людей. Вследствие высокой интенсивности указанных нагрузок применение традиционных методов проектирования конструкций, основанных на принципе полного восприятия динамического воздействия, приводит к значительным материальным и трудовым затратам. В настоящее время все большее развитие получают активные способы защиты конструкций, обеспечивающие снижение интенсивности динамической нагрузки. Исследования железобетонных балок [1–7] показывают, что степень уменьшения амплитуды динамической нагрузки зависит от стадии деформирования податливой опоры. Наибольшее снижение происходит при деформировании податливой опоры в пластической стадии. Для оценки влияния вертикальной податливости опор на усилия и перемещения опертых по контуру железобетонных плит проведены их экспериментальные исследования, результаты которых приведены в настоящей статье.

Экспериментальные исследования выполнены на моделях плит из бетона класса В20 размерами в плане 1500×1000 мм и толщиной 40 мм. Опытные образцы армированы плоской сеткой из арматуры Ø4 класса Вр500 с размерами ячейки 100×100 мм. Жесткое опирание плиты реализовывалось при помощи роликовых и шаровых опор. В качестве податливых опор использованы трубы наружным диаметром 42,8 мм и толщиной стенки 3,2 мм. Жесткость опор и, соответственно, стадия их деформирования регулировались длиной вставки кольцевого сечения [8].

Для регистрации показаний деформаций бетона и арматуры, перемещений и ускорений на опытные образцы установлен комплекс измерительных приборов. Фиксация и обработка регистрационных данных осуществлялись с использованием информационно-вычислительных комплексов МІС300М и МІС400D [9].

Измерения показаний тензорезисторов, датчиков перемещений и сило-измерительных датчиков обеспечивалось ИВК МІС400D по 64 каналам с частотами 80...7000 Гц. Измерения фиксировались с разрешением 16 двоичных разрядов ($2^{16} = 65\,536$ уровней измерений). ИВК МІС400D позволяет использовать четвертьмостовую, полумостовую и мостовую схемы измерений с номиналом 100...5000 Ом. Измерение показаний акселерометров обеспечивалось ИВК МІС300М по 16 каналам с частотой 64 000 Гц.

Синхронизация процесса измерений при динамических испытаниях обеспечивалась за счет последовательного включения ИВК МІС400D и МІС300М с последующим сбрасыванием испытательного груза (рис. 1). Первоначальные данные, полученные в процессе динамического нагружения, фиксировались информационно-вычислительными комплексами и впоследствии обрабатывались в программах Winpos, Excel и др.

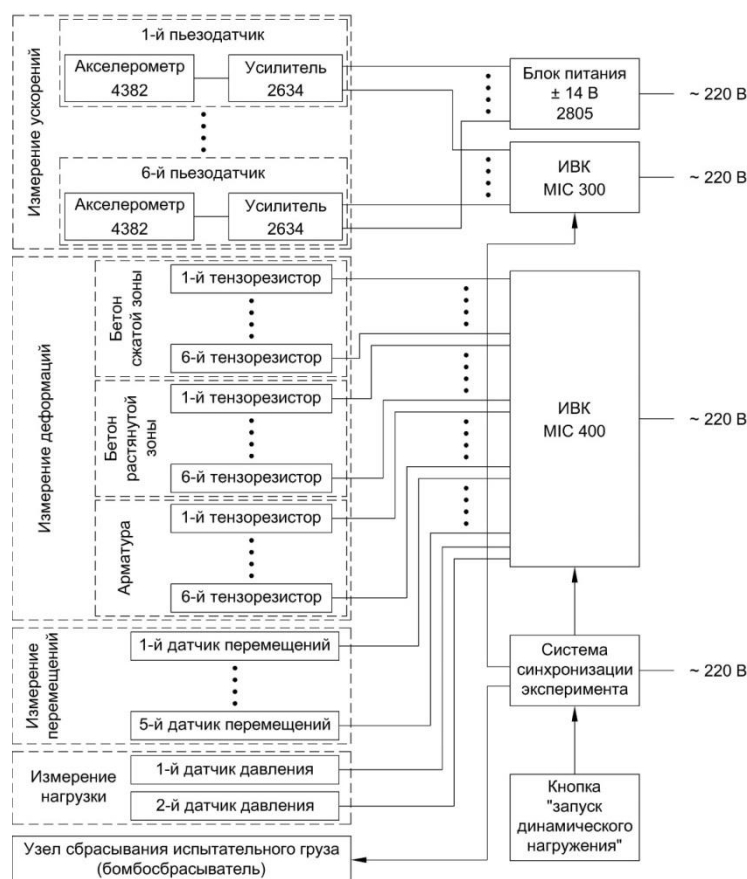


Рис. 1. Схема подключения испытательного оборудования при динамическом нагружении

Реакция системы определяется по показаниям датчиков давления и представляет собой обобщенную характеристику сопротивления конструкции внешнему динамическому воздействию. Схема распределения опорной реакции во времени представлена на рис. 2.

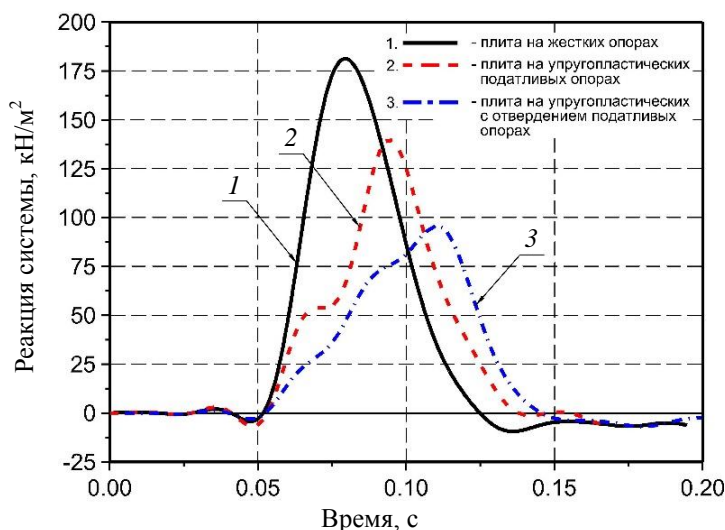


Рис. 2. Изменение реакции системы во времени для плит на жестких (1) и податливых опорах, сработавших в пластической стадии (2) и стадии отверждения (3)

Анализ опытных зависимостей показывает, что применение податливых опор приводит к снижению реакции системы на 22,5 и 47,4 % соответственно для плит, опоры которых сработали в упругопластической и упругопластической с отверждением стадиях, и увеличению времени динамического сопротивления конструкции на 11,4 и 29,8 % (рис. 2).

Для анализа перемещений плит рассмотрим пять сечений, проходящих через датчики перемещений и ускорений (рис. 3). Перемещения центральной зоны плиты принимаются по показаниям прогибомеров ДП-1...ДП-4. Помимо показаний прогибомеров, дополнительно, для определения перемещений, использованы показания датчиков ускорений ДУ-3 и ДУ-6. Перемещения в данном случае определены путем двойного интегрирования ускорений, измеренных в процессе испытаний.

Анализ перемещений плит на жестких и упругих податливых опорах показывает, что использование податливых опор, деформирующихся в упругой стадии, приводит к незначительному увеличению прогибов плит в средних сечениях 1–1 и 3–3 (рис. 4). В остальных сечениях перемещения незначительно ниже либо практически равны. Применение податливых опор, деформирующихся в упругопластической стадии и стадии отверждения, приводит к значительному снижению прогибов конструкции (рис. 5). Из представленных графиков видно, что в центральной части плит суммарные перемещения с учетом деформаций опор практически соизмеримы с перемещениями плит на жестких опорах. Однако действительные прогибы конструкции (за выче-

том деформаций опор) значительно меньше прогибов плит на жестких опорах во всех рассматриваемых сечениях. При этом основная часть прогибов обусловлена перемещениями плиты как жесткого тела.

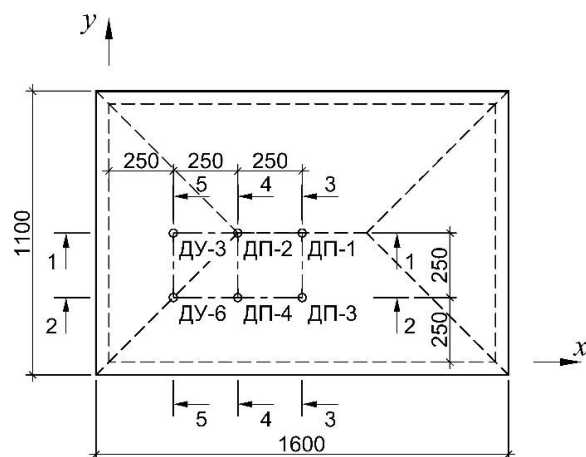


Рис. 3. Схема расстановки датчиков ускорений и перемещений

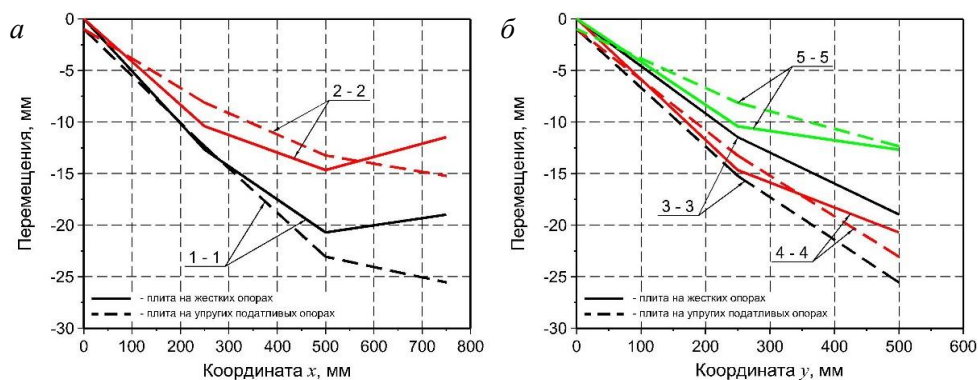


Рис. 4. Перемещения плит на жестких (а) и упругих податливых (б) опорах

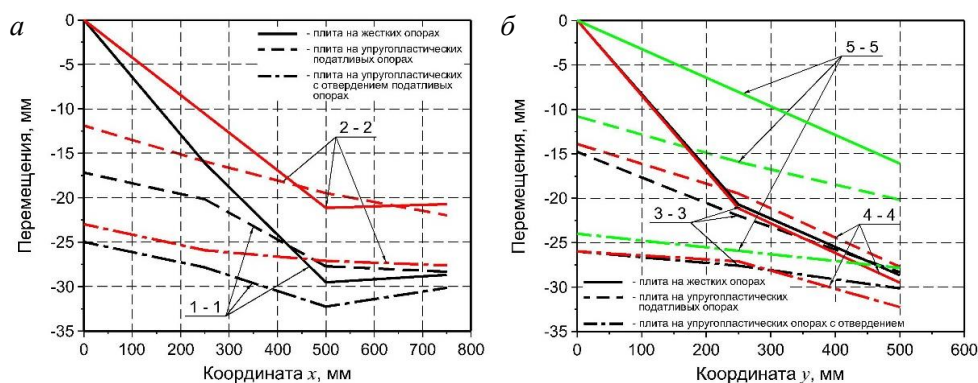


Рис. 5. Перемещения плит на жестких и податливых опорах, сработавших в упругопластической стадии (а) и стадии отвердения (б)

Также можно отметить, что действительные перемещения плит уменьшаются с увеличением величины деформаций опор в пластической стадии (рис. 5). Так, в сечении 1–1 при пластических деформациях опоры ~ 16 мм максимальный прогиб в центре плиты составляет ~ 8 мм. В то же время при пластической деформации опоры на 23 мм прогиб плиты составляет всего 2,3 мм.

Значения ускорений плит на жестких и упругих податливых опорах представлены на рис. 6. Из графиков видно, что в плитах на жестких опорах при однократном динамическом нагружении происходит один период колебаний с максимальной амплитудой, после чего наблюдается резкое затухание ускорений. Для плит на упругих податливых опорах колебательный процесс с максимальными амплитудами протекает более длительное время, которое составляет 2,5 периода, после чего начинается процесс затухания. Величина ускорений в плитах на упругих податливых опорах ниже на 25...40 %, при этом период колебаний незначительно выше.

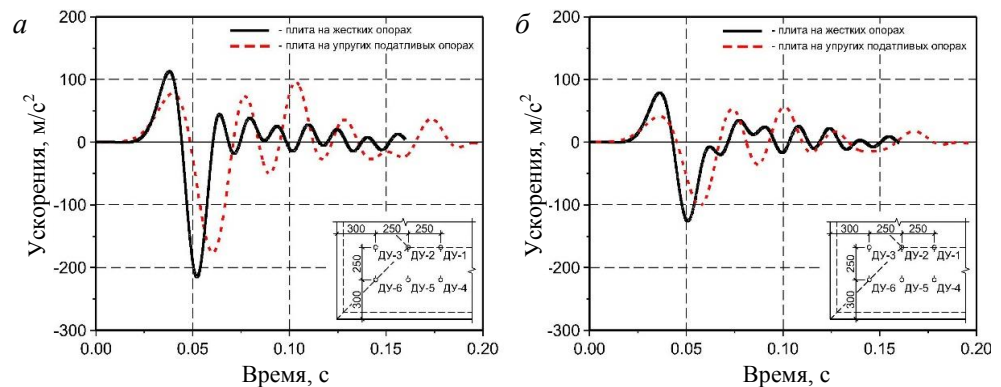


Рис. 6. Ускорения плит на жестких и упругих податливых опорах:

а – по показаниям акселерометра ДУ-1; б – по показаниям акселерометра ДУ-4

Изменение ускорений во времени для плит на податливых опорах, деформирующихся в упругопластической стадии и стадии отверждения, аналогично характеру изменения ускорений плит на жестких опорах. При этом амплитуда ускорений плит на податливых опорах больше амплитуды ускорений плит на жестких опорах на 24 % в центре плиты и на 17 и 33 % по месту установки датчика ускорений ДУ-4 (рис. 7). Более высокий уровень ускорений плит на податливых опорах связан с низким сопротивлением внешнему динамическому воздействию на опорном контуре при деформировании опор в пластической стадии. Рост ускорений плит на податливых опорах приводит к увеличению сил инерции, оказывающих сопротивление движению плиты, что, соответственно, ведет к снижению перемещений и деформаций конструкции.

Таким образом, выполненные экспериментальные исследования позволили подтвердить полученные ранее теоретические результаты [10, 11], свидетельствующие, что применение податливых опор, работающих только в упругой стадии, в опертых по контуру плитах при кратковременном динамическом нагружении, оказывает отрицательное влияние на деформирование

конструкции, выражающееся в росте перемещений и деформаций бетона и арматуры по сравнению с плитами на жестких опорах.

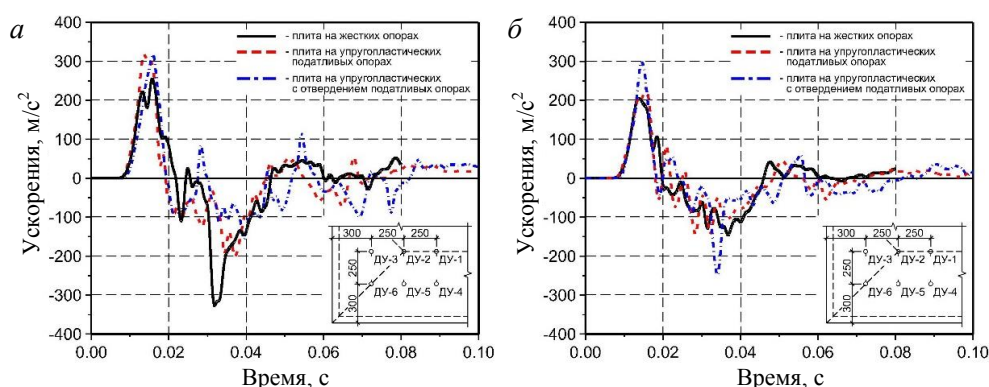


Рис. 7. Ускорения плит на жестких и податливых опорах, сработавших в упругопластической стадии и стадии отвердения:

a – по показаниям акселерометра ДУ-1; *б* – по показаниям акселерометра ДУ-4

Также экспериментально подтверждены результаты, показывающие, что применение податливых опор, деформирующихся в упругопластической стадии и стадии отвердения в опертых по контуру плитах, позволяет значительно снизить реакцию системы и перемещения конструкции. Последовательный переход податливых опор в стадию отвердения не приводит к резкому увеличению прогибов. Несмотря на незначительные локальные всплески перемещений и ускорений, обусловленные наступлением стадии отвердения опор, в целом перемещения значительно ниже аналогичных величин для плит на жестких опорах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кумпяк О.Г., Кокорин Д.Н. Экспериментальные исследования железобетонных балок по наклонным сечениям при кратковременном динамическом нагружении // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2011. № 1. С. 116–129.
2. Кумпяк О.Г., Малиновский А.П., Педиков А.В. Экспериментально-теоретическое исследование сжатых железобетонных балок на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2006. № 2. С. 110–114.
3. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Galyautdinov D.R. Experimental study of beams on yielding supports with thrust // MATEC Web of Conferences. 2018. 143. 01016. DOI: 10.1051/1.4973016
4. Кумпяк О.Г., Галютдинов З.Р., Кокорин Д.Н. Прочность и деформативность железобетонных конструкций на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении. Томск : Изд-во ТГАСУ, 2016. 270 с.
5. Галютдинов З.Р., Кумпяк О.Г. Расчет железобетонных балок на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении // Строительная механика и расчет сооружений. 2019. № 4. С. 63–70.
6. Расторгуев Б.С. Прочность железобетонных конструкций зданий взрывоопасных производств и специальных сооружений, подверженных кратковременным динамическим воздействиям : автореферат на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва, 1987. 37 с.

7. Саид А.-Р.А. Повышение несущей способности железобетонных конструкций при взрывных воздействиях : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 1995. 207 с.
8. Кумпяк О.Г., Галяутдинов З.Р., Максимов В.Б. Расчет длины податливой опоры // Лолейтовские чтения-150. Современные методы расчета железобетонных и каменных конструкций по предельным состояниям : сборник докладов Международной научно-практической конференции, Москва : МГСУ, 2018. С. 201–204.
9. Кумпяк О.Г., Однокопылов Г.И. Автоматизация испытаний железобетонных конструкций // Научные труды Общества железобетонщиков Сибири и Урала. Вып. 8. Новосибирск : НГАСУ, 2004. С. 122–125.
10. Galyautdinov Z. Calculation of reinforced concrete slabs on yielding supports under short-term dynamic loading // XXVI Conference on Numerical Methods for Solving Problems in the Theory of Elasticity and Plasticity (EPPS-2019). 2019. V. 221. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1051/epjconf/201922101009>
11. Кумпяк О.Г., Галяутдинов З.Р. Расчет железобетонных плит на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2012. № 2. С. 107–111.

REFERENCES

1. Kumpjak O.G., Kokorin D.N. Eksperimental'nye issledovaniya zhelezobetonnykh balok po naklonnym sechenijam pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhении [Experimental investigation of reinforced concrete beams in inclined cross-sections under dynamic load]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2011. No. 1. Pp. 116–129. (rus)
2. Kumpjak O.G., Malinovskij A.P., Pedikov A.V. Eksperimental'no-teoreticheskoe issledovanie szhatykh zhelezobetonnykh balok na podatlivykh oporah pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhении [Compressed reinforced concrete beams on yielding supports under dynamic load]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2006. No. 2. Pp. 110–114. (rus)
3. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Galyautdinov D.R. Experimental study of beams on yielding supports with thrust. *MATEC Web of Conferences*. 2018. V. 143. 01016. DOI: 10.1051/1.4973016
4. 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, 2016. 270 p. (rus)
5. Galyautdinov Z.R., Kumpyak O.G. Raschet zhelezobetonnykh balok na podatlivykh oporah pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhении. [Strength analysis of reinforced concrete beams on yielding supports under dynamic load]. *Stroitel'naya mexanika i raschet sooruzhenij*. 2019. No. 4. Pp. 63–70. (rus)
6. Rastorguev B.S. Prochnost' zhelezobetonnykh konstrukcij zdaniy vzyryvoopasnykh proizvodstv i special'nykh sooruzhenij, podverzhennykh kratkovremennym dinamicheskim vozdeystviyam: Avtoref. diss. dokt. tehn. nauk [Strength of reinforced concrete structures of buildings of hazardous industries under dynamic load. DSc Abstract]. 1987. 37 p. (rus)
7. Said A.-R.A. Povyshenie nesushhej sposobnosti zhelezobetonnykh konstrukcij pri vzyryvnykh vozdeystviyah. Diss. kand. tehn. nauk [Improvement of load-bearing capacity of reinforced concrete structures in explosion conditions. PhD Thesis]. 1995. 207 p. (rus)
8. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Maksimov V.B. Raschet dliny podatlivoy opory [Length analysis of yielding support]. In: Lolejtovskie chteniya-150 Sovremennye metody rascheta zhelezobetonnykh i kamennykh konstrukcij po pre-del'nykh sostoyaniyam. Sbornik dokladov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii (*Proc. Sci. Conf. 'Modern Methods of Limit Design of Reinforced Concrete and Masonry Structures', Loleitov Readings-150*). Pp. 201–204. (rus)
9. Kumpyak O.G., Odnokopylov G.I. Avtomatizaciya ispytaniy zhelezobetonnykh konstrukcij [Automated testing of reinforced concrete structures]. Novosibirsk: NGASU, 2004. Pp. 122–125. (rus)
10. Galyautdinov Z. Calculation of reinforced concrete slabs on yielding supports under short-term dynamic loading. In: *Proc. 26th Conf. on Numerical Methods for Solving Problems in the*

Theory of Elasticity and Plasticity. 2019. V. 221. Pp. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1051/epjconf/201922101009>

11. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R. Raschet zhelezobetonnykh plit na podatlivykh oporakh pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhении [Strength analysis of reinforced concrete slabs on yielding supports under dynamic load]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2012. No. 2. Pp. 107–111. (rus)

Сведения об авторах

Однокопылов Георгий Иванович, докт. техн. наук, профессор, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, ogiz@yandex.ru

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

Максимов Валерий Борисович, аспирант, Международный телематический университет УНИНЕТТУНО, Италия, г. Рим, пр. Витторио Эмануэля II, 39, Maximov.valeriy@gmail.com

Authors Details

Georgii I. Odnokopylov, DSc, Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia, ogiz@yandex.ru

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

Valeriy B. Maksimov, Research Assistant, International Telematic University UNINETTUNO, Corso Vittorio Emanuele II, 39, 00186, Rome, Italy, Maximov.valeriy@gmail.com