

УДК 624.012.042.8.001.2

DOI: 10.31675/1607-1859-2018-20-4-103-110

*З.Р. ГАЛЯУТДИНОВ, Д.Р. ГАЛЯУТДИНОВ, М.В. ГАНДЗИЙ,
Томский государственный архитектурно-строительный университет*

ЧИСЛЕННО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОДАТЛИВЫХ ОПОР ПРИ КРАТКОВРЕМЕННОМ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Однократные динамические воздействия аварийного характера возникают на промышленных предприятиях и в защитных сооружениях гражданской обороны. Эффективным способом снижения величины динамического воздействия является применение податливых опор в виде сминаемых вставок кольцевого сечения. Для оценки влияния деформирования податливых опор на работу железобетонных конструкций необходимо определить особенности динамического деформирования сминаемых вставок кольцевого сечения. В настоящее время в теоретических расчетах используются характеристики податливых опор, полученные по результатам статических испытаний. Данные о динамических характеристиках податливых опор отсутствуют. В настоящей работе представлены результаты экспериментальных и численных исследований податливых опор при кратковременном динамическом нагружении. В численных исследованиях, с применением программного комплекса Ansys, разработана расчетная модель податливой опоры, согласующаяся с полученными опытными данными.

Ключевые слова: податливая опора; кратковременная динамическая нагрузка; опорная реакция; перемещения; расчетная модель; упругопластическая стадия; стадия отвердения.

Для цитирования: Галяутдинов З.Р., Галяутдинов Д.Р., Гандзий М.В. Численно-экспериментальные исследования податливых опор при кратковременном динамическом нагружении // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20. № 4. С. 103–110.

*Z.R. GALYAUTDINOV, D.R. GALYAUTDINOV, M.V. GANDZIY,
Tomsk State University of Architecture and Building*

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF YIELDING SUPPORTS IN DYNAMIC LOADING

Dynamic impacts of emergency nature occur in industrial enterprises and protective structures of civil defense. An effective way to reduce the dynamic impact is the use of yielding supports in the form of annular tubes. To assess the effect of deformation of yielding supports on reinforced concrete structures, it is necessary to determine the features of dynamic deformation of the crumpled inserts of the ring section. In theoretical calculations, characteristics obtained as a result of static testing yielding supports are currently used. Data on the dynamic characteristics of yielding supports are not available. This paper presents results of experimental and numerical studies on yielding supports under dynamic loading. Using the ANSYS finite element program, a numerical model is developed for the yielding support consistent with the obtained experimental data.

Keywords: yielding support; dynamic load; support reaction; displacement; numerical model; elastoplastic stage; hardening stage.

For citation: Galyautdinov Z.R., Galyautdinov D. R., Gandziy M.V. Chislenno-eksperimental'nye issledovaniya podatlivykh opor pri kratkovremennom dinamicheskom

nagurzhonii [Numerical and experimental research of yielding supports in dynamic loading]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2018. V. 20. No. 4. Pp. 103–110. (rus)

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. Экспериментально-теоретические исследования железобетонных конструкций отечественных [1–6] и зарубежных [7–10] ученых показывают, что одним из эффективных способов повышения их сопротивления указанным воздействиям является применение податливых опор. При этом степень снижения динамической реакции определяется стадией деформирования податливой опоры и соотношением жесткостей опоры и конструкции. Для оценки характеристик податливых опор в виде сминаемых вставок кольцевого сечения при кратковременном динамическом нагружении проведены экспериментальные и численные исследования, результаты которых приведены в статье.

Программа экспериментальных исследований податливых опор включала динамические испытания металлических вставок кольцевого профиля. Для испытаний приняты образцы внутренним диаметром 25,4 мм и толщиной стенки 3,2 мм. Длина опытных образцов принята 20, 40, 60, 80, 100 мм и определена из условия их деформирования в упругопластической стадии и стадии отвердения. Общее количество образцов – 25:5 серий по 5 образцов в каждой серии.

Испытание податливых опор производилось на разработанном стенде в два этапа (рис. 1). На первом этапе определялась реакция системы при жестких опорах, на втором – изменение во времени реакции податливых опор.

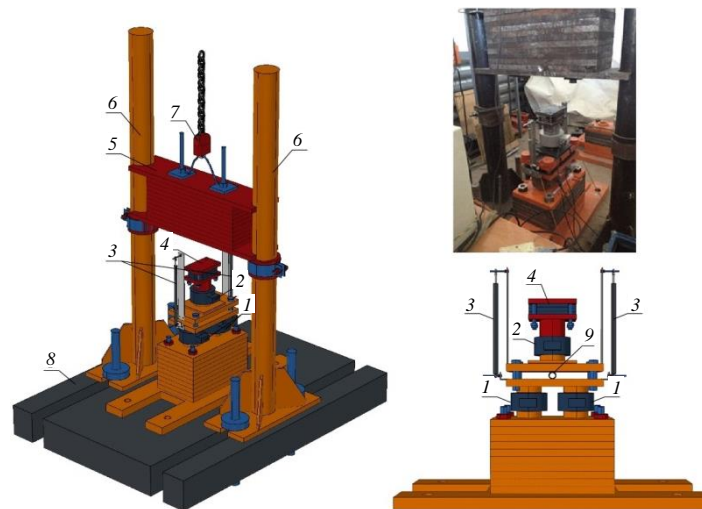


Рис. 1. Стенд для испытания податливых опор при кратковременном динамическом нагружении:

1 – датчики опорных реакций (силоизмерительный датчик ДСТ 4126); 2 – датчик динамического воздействия (силоизмерительный датчик ДСТ4126); 3 – датчики перемещений; 4 – демпфирующий резинометаллический блок; 5 – сбрасываемый груз; 6 – направляющие; 7 – сбрасывающее устройство; 8 – силовой пол; 9 – испытуемый образец

В процессе испытаний производилось измерение и анализ показаний силоизмерительных датчиков тензорезисторного типа ДСТ4126 и датчиков для регистрации перемещений марки RL150-G-SR. Показания приборов фиксировали изменение величины динамического воздействия, опорной реакции и перемещений. Показания датчиков регистрировались и обрабатывались при помощи электронно-вычислительных комплексов МІС-300М и МІС-036R.

Высота падения груза составляла 150 мм. Масса сбрасываемого груза – 450 кг. Высота падения и масса груза определялись исходя из обеспечения деформирования податливых опор различной длины в упругопластической стадии и стадии отвердения.

По результатам проведенных испытаний получены схемы деформирования опор при динамическом воздействии (рис. 2). Анализ схем деформирования показывает, что опоры первой и второй серии (длиной 20 и 40 мм) при действии динамической нагрузки перешли в стадию отвердения. Деформации опор третьей серии (длиной 60 мм) свидетельствуют о полном исчерпании пластической стадии деформирования и начале перехода в стадию отвердения. Деформирование опор четвертой и пятой серии (длиной 80 и 100 мм) остановилось в пластической стадии без перехода в стадию отвердения.



Рис. 2. Схемы динамического деформирования опытных образцов

По результатам экспериментальных исследований получены графики (рис. 3 и 4), анализ которых показывает, что независимо от стадии деформирования податливой опоры наблюдается снижение реакции по сравнению с реакцией жесткой опоры. При деформировании опор в пластической стадии реакция прямо пропорциональна жесткости опор, переход опоры в стадию отвердения приводит к резкому росту реакции. Из графиков на рис. 3 видно, что податливые опоры, деформирующиеся в упругопластической стадии без перехода в стадию отвердения, несмотря на их большую жесткость и меньшую эффективность в пластической стадии деформирования, в конечном итоге приводят к большему снижению реакции, чем податливые опоры, деформирующиеся с переходом в стадию отвердения. Последние, после перехода в стадию отвердения, в результате резкого роста реакции оказываются менее эффективными. Снижение реакции опор, деформирующихся в упругопласти-

ческой стадии без перехода в стадию отверждения, составило 64 %, а для опор, сработавших в упругопластической стадии с отверждением, – 23 %.

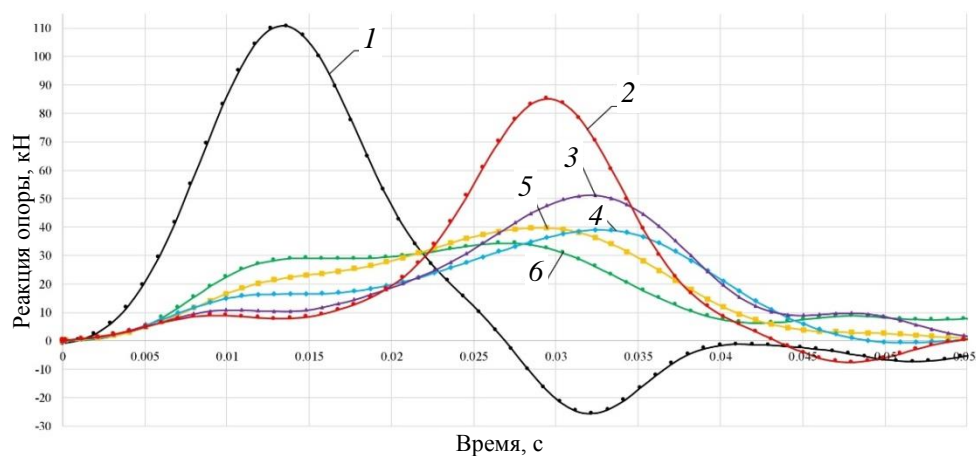


Рис. 3. Диаграмма изменения динамической реакции опор:

1 – для жестких опор; 2 – для податливых опор длиной 20 мм; 3 – для податливых опор длиной 40 мм; 4 – для податливых опор длиной 60 мм; 5 – для податливых опор длиной 80 мм; 6 – для податливых опор длиной 100 мм

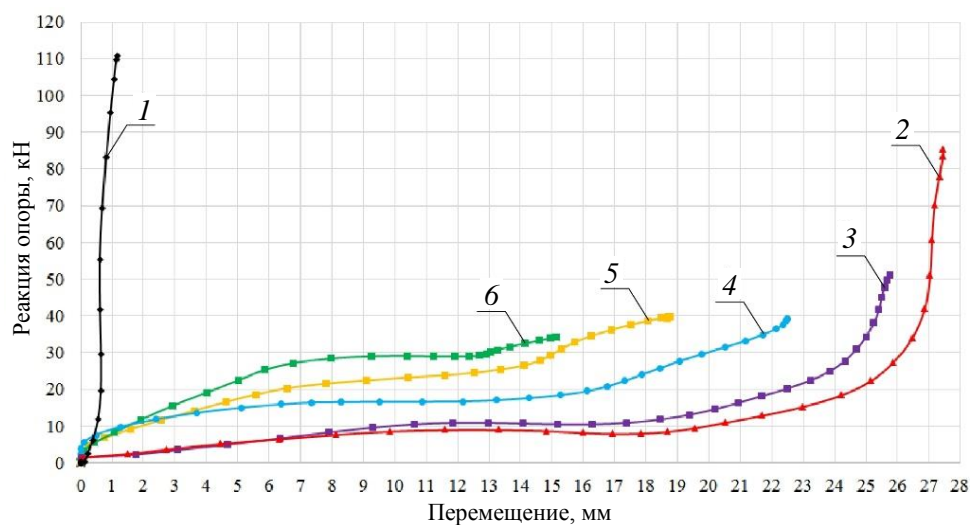


Рис. 4. Диаграмма деформирования податливых опор при кратковременном динамическом нагружении:

1 – для жестких опор; 2 – для податливых опор длиной 20 мм; 3 – для податливых опор длиной 40 мм; 4 – для податливых опор длиной 60 мм; 5 – для податливых опор длиной 80 мм; 6 – для податливых опор длиной 100 мм

Наличие перехода в стадию отверждения связано с энергоемкостью опор. Энергия внешнего воздействия во всех случаях одинакова, поскольку масса падающего груза и высота его падения остаются постоянными. Опоры длиной

20 и 40 мм обладают меньшей энергоемкостью, чем энергия внешнего воздействия, в результате чего происходит переход опоры в стадию отвердения и выключение ее из работы. Энергоемкость опор, работающих в упругопластической стадии без отвердения, достаточна для восприятия энергии внешнего воздействия в полном объеме, при этом не происходит переход опоры в стадию отвердения.

Также можно отметить, что одновременно со снижением реакции происходит увеличение времени динамического воздействия (рис. 3), что приводит к увеличению периода и снижению частоты колебаний конструкций на податливых опорах.

Таким образом, можно отметить, что деформирование податливых опор в пределах упругопластической стадии является наиболее оптимальным решением для максимальной сохранности конструкций при интенсивном динамическом воздействии.

В численных исследованиях разработана расчетная модель податливой опоры в ПК ANSYS [11–13]. Динамический расчет податливой опоры выполнялся в модуле Explicit Dynamics.

Конечно-элементная модель состоит из четырех плит (рис. 5). Опорная плита (поз. 1) является неподвижной, две другие плиты (поз. 2 и 3) моделируют демпфирующий блок, плита (поз. 4) представляет собой падающий груз. Пластины в демпфирующем блоке соединены с помощью контакта Spring. Условия закрепления элементов (поз. 2, 3 и 4) обеспечивают возможность их перемещения только в вертикальном направлении. Поскольку жесткость пластин значительно выше жесткости податливой опоры (поз. 5), все пластины в расчетной схеме приняты как абсолютно жесткие элементы.

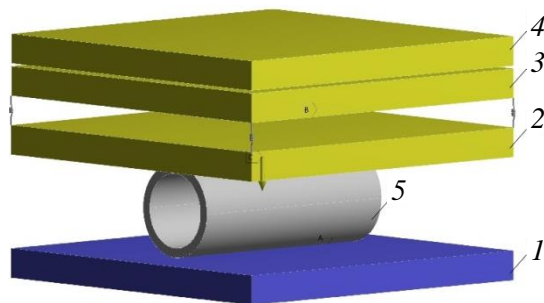


Рис. 5. Расчетная схема податливой опоры

Расчет производился для всех рассматриваемых длин податливых опор в диапазоне от 20 до 100 мм. Размерность решаемой задачи, в зависимости от длины податливой опоры, варьировалась от 10 656 до 49 056 конечных элементов.

Поперечное сечение и длина податливых опор приняты в соответствии с экспериментальными данными.

В расчете моделировался момент столкновения груза с податливой опорой, причем масса груза соответствовала массе и скорости падения груза, полученных по результатам экспериментальных исследований.

Предварительно выполнен анализ влияния шага разбиения сетки конечных элементов опоры на опорную реакцию и деформацию с шагом сетки 3; 2; 1,5; 1 мм. Результаты расчета с различными сетками КЭ представлены на диаграммах (рис. 6).

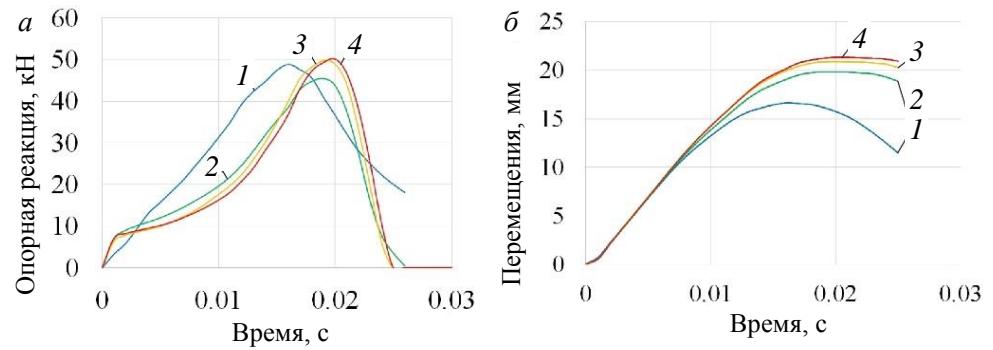


Рис. 6. Влияние размера сетки конечных элементов на величину опорной реакции (а) и перемещений (б):
1 – шаг сетки КЭ 3,0 мм; 2 – шаг сетки КЭ 2,0 мм; 3 – шаг сетки КЭ 1,5 мм; 4 – шаг сетки КЭ 1,0 мм

По результатам расчета видно, что на крупных сетках КЭ точность расчета низкая (расхождения по перемещениям составляют 22 %, по опорной реакции – 3 %, по времени – 20 %, или 0,004 с). По мере сгущения сетки точность увеличивается. Согласно графикам, можно сделать вывод, что при уменьшении сетки конечных элементов с 1,5 до 1 мм влияние сгущения сетки на максимальную опорную реакцию составило всего 1 %, на максимальное перемещение – 2 %, а время расчета увеличилось в 2,4 раза. На основе этого анализа для дальнейших расчетов принят шаг сетки КЭ для опор 1,5 мм.

С применением разработанной модели выполнены динамические расчеты податливых опор различной длины (в соответствии с экспериментальными данными). Данные результатов расчета удовлетворительно согласуются с опытными величинами (рис. 7).

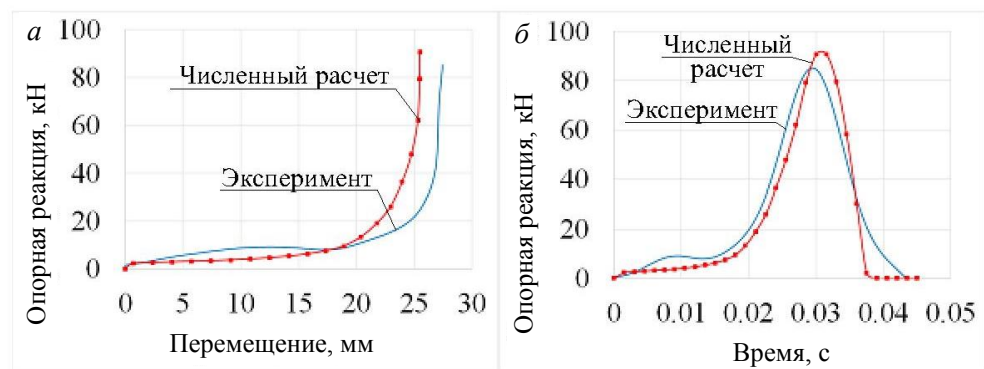


Рис. 7. Диаграммы динамического деформирования податливых опор длиной 20 мм (а) и изменение реакции опоры длиной 20 мм (б) во времени

Таким образом, по результатам выполненных исследований изучено влияние податливых опор и их эффективность относительно жестких опор при действии кратковременной динамической нагрузки. При использовании податливых опор в виде сминаемых вставок кольцевого сечения показано и проанализировано снижение динамической реакции, которое происходит за счет энергопоглощения опор. Рассмотрено влияние жесткости опор и стадии их деформирования. Наиболее оптимальным решением для максимальной сохранности конструкций при интенсивном динамическом воздействии является деформирование податливых опор в пределах упругопластической стадии без перехода в стадию отвердения. Разработанная численная модель удовлетворительно описывает деформирование податливых опор при кратковременном динамическом нагружении, зафиксированное в экспериментальных исследованиях, в связи с этим расчетная модель может быть применена в численных исследованиях железобетонных конструкций на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
2. Кумпяк О.Г., Мецеулов Н.В., Люевич Я.С. Динамическая прочность и деформативность наклонных сечений сжато-изгибаемых железобетонных конструкций на податливых опорах // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 6. С. 150–159.
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. DOI: 10.1051/1.4973016.
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. № 96. P. 88–99.
5. Кумпяк О.Г., Мецеулов Н.В. Численное моделирование податливых опор в виде труб кольцевого сечения при статическом и кратковременном динамическом нагружении // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 5. С. 121–134.
6. Kumpyak O.G., Mesheulov N.V. Numerical simulation of yielding supports the shape of annular tubes under static and short-term dynamic loadings // International Journal for computational Civil and Structural Engineering. 2017. V. 13. № 4. P. 103–113.
7. Elfetori F.A. Experimental Testing of Composite Tubes with Different Corrugation Profile Subjected to Lateral Compression Load // World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mechanical, Industrial Science and Engineering. 2013. V. 7. № 2.
8. Fan Z., Shen J., Lu G. Investigation of Lateral Crushing of Sandwich Tubes // The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction Procedia Engineering. 2011. V. 14. P. 442–449.
9. Lion K.H., Amir R.A. G., Prasetyo E., Khairi Y. Impact Energy Absorption of Concentric Circular Tubes // Wseas transactions on applied and theoretical mechanics. 009. V. 4. № 3.
10. Lipa S., Kotelko M. Lateral impact of tubular structure – theoretical and experimental analysis. Part 1 – Investigation of single tube // Journal of theoretical and applied mechanics. 2013. V. 51. № 4. P. 873–882.
11. Бруяка В.А., Фокин В.Г., Кураева Я.В. Инженерный анализ в Ansys Workbench. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. 149 с.
12. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера. Практическое руководство. М.: Либроком, 2013. 272 с.
13. Lee H.H. Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 18.

REFERENCES

1. *Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Kokorin D.N.* Prochnost' i deformativnost' zhelezobetonnykh konstruktsiy na podatlivykh oporakh pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhении [Strength and deformability of reinforced concrete structures on yielding supports under dynamic load]. Tomsk: TSUAB Publ., 2016. 270 p. (rus)
2. *Kumpyak O.G., Meshcheulov N.V., Lyulevich Y.S.* Dinamicheskaya prochnost' i deformativnost' naklonnykh sechenii szhato-izgibaemykh zhelezobetonnykh konstrukttsii na podatlivykh oporakh [Dynamic strength and deformability of oblique planes in compressed and bended yielding supports]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2016. No. (6). Pp. 150–159. (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; doi: 10.1051/1.4973016.
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. *Kumpyak O.G., Meshcheulov N.V.* Chislennoye modelirovaniye podatlivykh opor v vide trub kol'tsevogo secheniya pri staticheskom i kratkovremennom dinamicheskom nagruzhении [Numerical simulation of yielding supports in the form of annular tubes under static and dynamic loads]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2017. No. 5. Pp. 121–134. (rus)
6. *Kumpyak O.G., Meshcheulov N.V.* Numerical simulation of yielding supports the shape of annular tubes under static and short-term dynamic loadings. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2017. V. 13. No. 4. Pp. 103–113.
7. *Elfetori F.A.* Experimental testing of composite tubes with different corrugation profile subjected to lateral compression load. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mechanical, Industrial Science and Engineering*. 2013. V. 7. No. 2.
8. *Fan Z., Shen J., Lu G.* Investigation of lateral crushing of sandwich tubes. *The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction Procedia Engineering*. 2011. V. 14. Pp. 442–449.
9. *Lion K.H., Amir R.A.G., Prasetyo E., Khairi Y.* Impact energy absorption of concentric circular tubes. *Wseas Transactions on Applied and Theoretical Mechanics*. 2009. V. 4. No. 3.
10. *Lipa S., Kotelko M.* Lateral impact of tubular structure – theoretical and experimental analysis. Part 1 – Investigation of single tube. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2013. V. 51. No. 4. Pp. 873–882.
11. *Bruyaka V.A., Fokin V.G., Kuraeva Ya.V.* Inzhenernyj analiz v ANSYS Workbench [Engineering analysis in ANSYS Workbench]. Samara: SamSTU, 2013. 149 p. (rus)
12. *Kaplun A.B., Morozov E.M., Olfereva M.A.* ANSYS v rukah inzhenera [ANSYS in hands of an engineer]. Moscow: Librokom, 2013. 272 p. (rus)
13. *Lee H.H.* Finite element simulations with ANSYS Workbench 18.

Сведения об авторах

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

Галяутдинов Дауд Рашидович, аспирант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, DaudG@yandex.ru

Гандзий Михаил Владимирович, магистрант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, mishgan_24@mail.ru

Authors Details

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

Daud R.Galyautdinov, Research Assistant, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, DaudG@yandex.ru

Mikhail V. Gandziy, Undergraduate, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, mishgan_24@mail.ru