

УДК 624.072

*КУМПЯК ОЛЕГ ГРИГОРЬЕВИЧ, докт. техн. наук, профессор,
kumpyak@yandex.ru*

*МЕЩЕУЛОВ НИКИТА ВЛАДИМИРОВИЧ, аспирант,
nikita.mesheulov@mail.ru*

*ЛЮЛЕВИЧ ЯН СЕРГЕЕВИЧ, магистрант,
yan_lyulevich@mail.ru*

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

ДИНАМИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ НАКЛОННЫХ СЕЧЕНИЙ СЖАТО-ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ПОДАТЛИВЫХ ОПОРАХ*

Приводятся результаты исследований наклонных сечений сжато-изгибаемых конструкций на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении. Рассматривается случай динамического сопротивления железобетонных конструкций по наклонным сечениям при работе поперечной арматуры в области условно упругого деформирования. Установлено, что продольное сжимающее усилие и использование податливых опор оказывают существенное влияние на деформативность и прочность наклонных сечений изгибаемых элементов при динамическом воздействии.

Ключевые слова: динамическая нагрузка; сжато-изгибаемые железобетонные элементы; прочность; деформативность; наклонные сечения; податливые опоры.

*OLEG G. KUMPYAK, DSc, Professor,
kumpyak@yandex.ru*

*NIKITA V. MESHCHEULOV, Research Assistant,
nikita.mesheulov@mail.ru*

*YAN S. LYULEVICH, Undergraduate Student,
yan_lyulevich@mail.ru*

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

DYNAMIC STRENGTH AND DEFORMABILITY OF OBLIQUE PLANES IN COMPRESSED AND BENDED YIELDING SUPPORTS

The paper presents the investigation results of oblique planes in compressed and bended reinforced concrete yielding supports subjected to the dynamic loading. The dynamic resistance of oblique sections is considered for these supports under the conditions of the elastic deformation of lateral reinforcement. It is shown that the longitudinal compressive strength and the use of yielding supports significantly affect the deformability and strength of oblique planes under the dynamic loading.

* Исследования проведены при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, № проекта 16-38-00133.

Keywords: dynamic load; compressed and bended yielding support; strength; deformability; oblique plane.

Актуальность решения научной задачи обусловлена увеличением вероятности взрывных и других быстропротекающих динамических воздействий на конструкции промышленных зданий и сооружений, а также их повреждения и разрушения. Взрывные воздействия относятся к однократным аварийным нагрузкам, они характеризуются скоротечностью действия и высокой интенсивностью, что приводит не только к разрушению конструкций и повреждению технологического оборудования, но и к гибели людей.

Существующие подходы к проектированию строительных систем, устойчивых к ударным и взрывным воздействиям, основаны на увеличении материалоемкости конструкций, что приводит к повышению стоимости объектов. Таким образом, возникает потребность в создании альтернативных экономически целесообразных и надежных подходов к проектированию конструкций, устойчивых к восприятию динамических нагрузок.

Податливые опоры [1] являются одним из активных способов защиты конструкций, основанных на предотвращении или локализации динамического воздействия либо снижении интенсивности динамической нагрузки [2–5].

В настоящее время результаты исследований в области применения податливых опор для защиты конструкций, подверженных динамическим нагрузкам большой интенсивности, носят фрагментарный характер. Представленные экспериментальные, теоретические и экспериментально-теоретические исследования [6–9] свидетельствуют не только о положительном, но и об отрицательном влиянии податливости опорных креплений на динамическую реакцию железобетонных изгибаемых конструкций. Предметом исследования настоящей работы является экспериментальное изучение напряженно-деформированного состояния наклонных сечений железобетонных сжато-изгибаемых конструкций при динамических нагрузках с учетом податливости опор. В качестве податливых опор использованы сминаемые вставки кольцевого сечения.

Предварительно было проведено экспериментальное исследование сминаемых вставок различной длины, внутренний диаметр которых составлял 27,2 мм, внешний 33,5 мм, на действие квазистатической нагрузки (рис. 1). Испытания сминаемых вставок производились на электромеханической экспериментальной установке INSTRON-3382 с постоянной скоростью нагружения 200 мм/мин. По результатам испытаний была зафиксирована линейная зависимость между нагрузкой и деформированием опоры в упругой и пластической стадиях, выделены характерные границы стадий работы податливых опор. Было установлено, что самой благоприятной для восприятия динамического воздействия является упругопластическая стадия ввиду её большей продолжительности пластического деформирования.

С учетом характера деформирования податливых опор были проведены экспериментальные исследования железобетонных балок согласно разработанной методике [1] и программе (табл. 1).

Шифр образца указывает на условия испытания конструкции. Индекс (Д) в обозначении информирует о динамическом испытании. Следующие буквы обозначают стадию динамического деформирования опоры: (Ж) – жесткая

(условно недеформируемая); (УП) – упругопластическая. Цифра шифра, указывает на относительный уровень продольного сжимающего усилия.

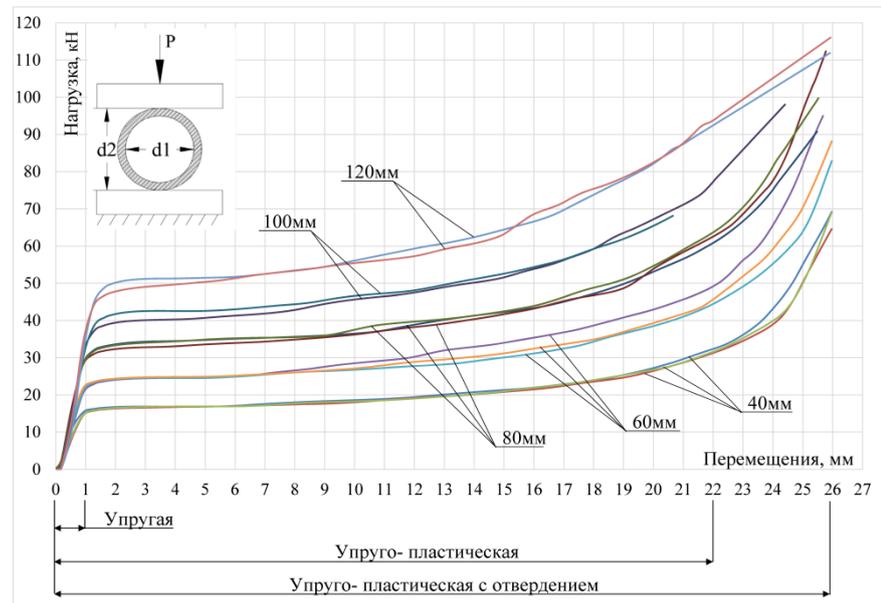


Рис. 1. Диаграмма деформирования податливых опор разной длины:
 $d1$ – внутренний диаметр; $d2$ – внешний диаметр

Таблица 1

Программа экспериментальных исследований

Уровень обжатия	Шифры образцов	Количество
$N = 0$	БДЖ-0	2
	БДУП-0	2
$N = 0,2N_{\max}^*$	БДЖ-02	2
	БДУП-02	2
$N = 0,4N_{\max}^*$	БДЖ-04	2
	БДУП-04	2

* $N_{\max} = R \cdot b \cdot h$.

Экспериментальные исследования сжато-изгибаемых конструкций проводились на балках-близнецах, выполненных из тяжелого бетона марки М400. Геометрические параметры образцов и схема армирования представлены на рис. 2.

Динамическое нагружение осуществлялось путём свободного падения груза на испытуемый образец и передавалось в двух сечениях на расстоянии $2h_0$ от опоры. Согласно предварительным расчетам конструкций на действие динамической нагрузки [10] и анализу деформирования идентичных конструкций при статическом нагружении, масса груза была принята 350 кг, высота его падения 150 мм.

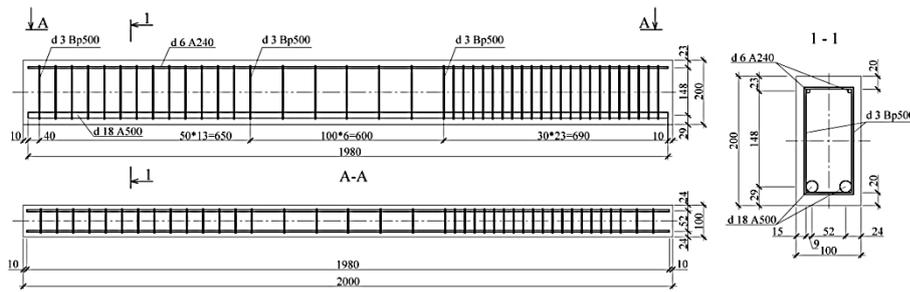


Рис. 2. Схема армирования экспериментальных образцов

Проведенные экспериментальные исследования показали, что при повышении уровня продольного сжимающего усилия происходит увеличение реакции конструкции на динамическое воздействие. Данную закономерность можно проследить на диаграммах сопротивления наклонных сечений конструкций динамической нагрузке (рис. 3–8).

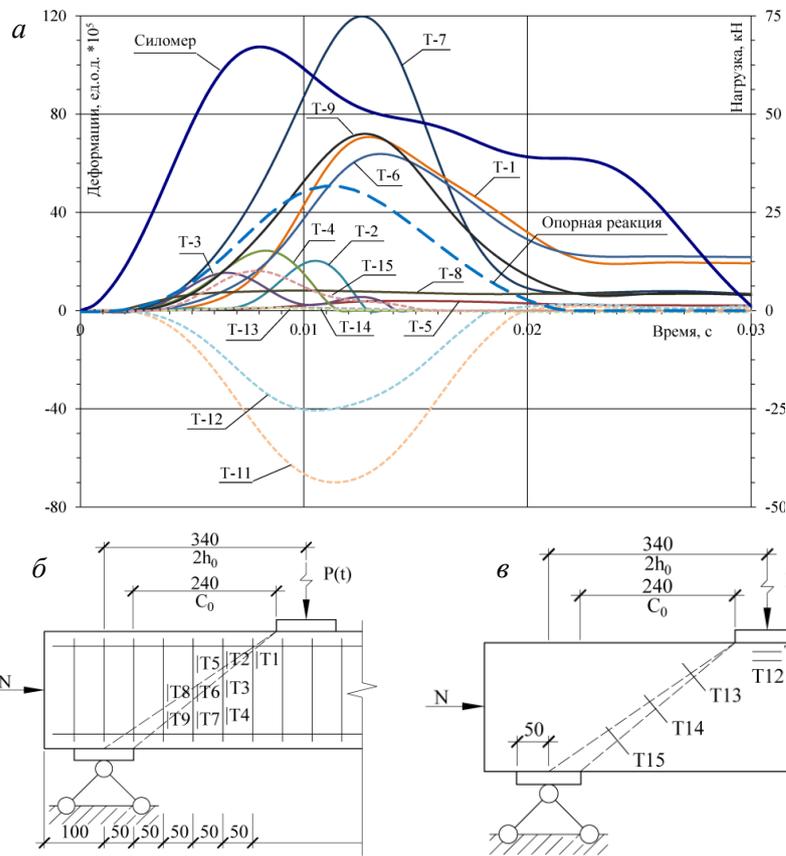


Рис. 3. Диаграмма развития деформаций арматуры и бетона наклонного сечения балки на жёстких опорах при кратковременном динамическом нагружении без продольного обжатия ($N = 0$) (а); расположение датчиков деформаций на поперечной арматуре (б); расположение датчиков деформаций на бетоне (в)

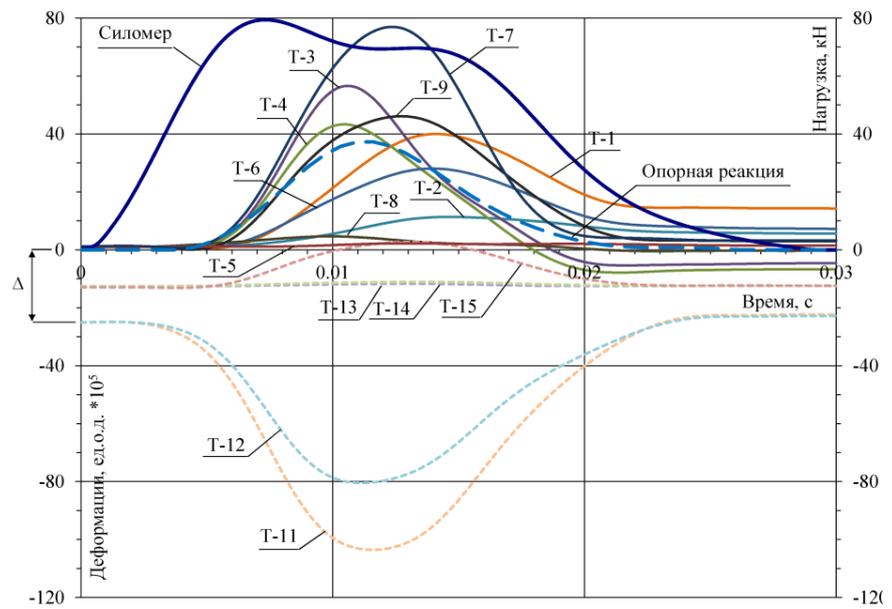


Рис. 4. Диаграмма развития деформаций арматуры и бетона наклонного сечения балки на жёстких опорах при кратковременном динамическом нагружении с продольным обжатием $N = 0,2N_{\max}$; Δ – начальные деформации в результате продольного обжатия

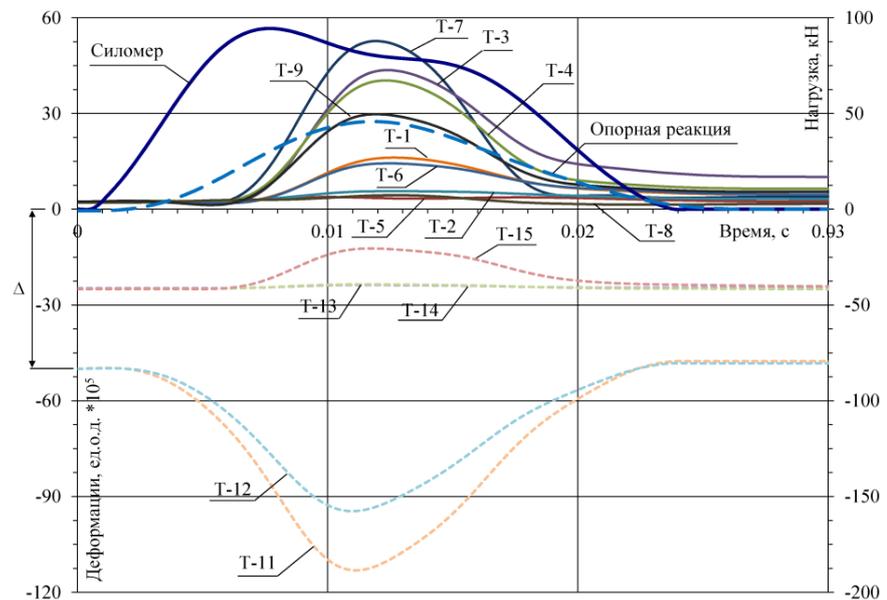


Рис. 5. Диаграмма развития деформаций арматуры и бетона наклонного сечения балки на жёстких опорах при кратковременном динамическом нагружении с продольным обжатием $N = 0,4N_{\max}$; Δ – начальные деформации в результате продольного обжатия

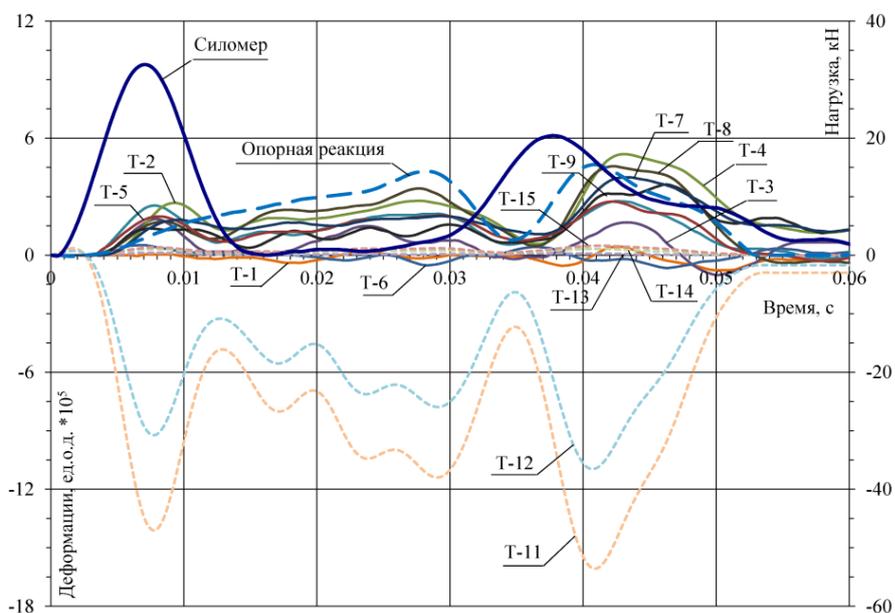


Рис. 6. Диаграмма развития деформаций арматуры и бетона наклонного сечения балки на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении без продольного обжатия

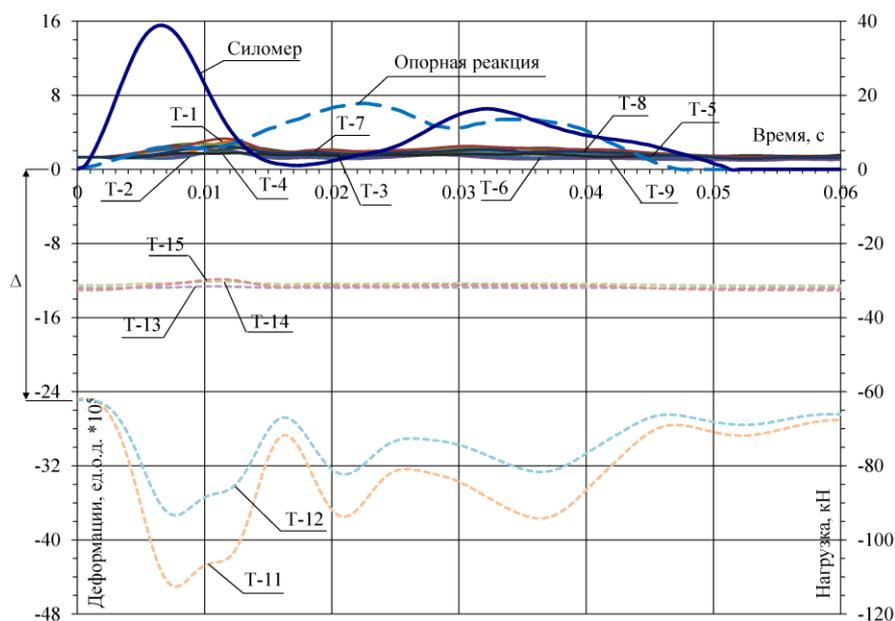


Рис. 7. Диаграмма развития деформаций арматуры и бетона наклонного сечения балки на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении с продольным обжатием $N = 0,2N_{max}$; Δ – начальные деформации в результате продольного обжатия

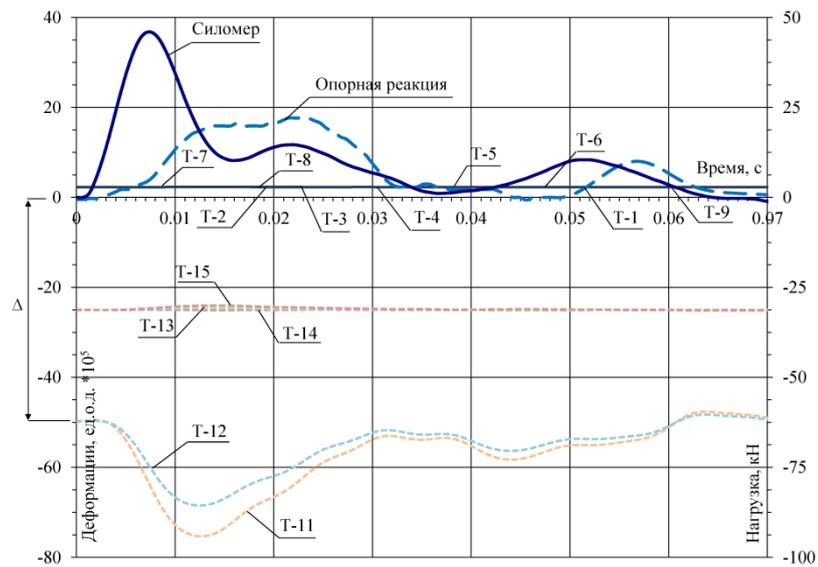


Рис. 8. Диаграмма развития деформаций арматуры и бетона наклонного сечения балки на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении с продольным обжатием $N = 0,4N_{\max}$; Δ – начальные деформации в результате продольного обжатия

Степень влияния продольного сжимающего усилия и податливых опор на прочность и деформативность наклонных сечений изгибаемых железобетонных конструкций при поперечном динамическом воздействии можно оценить по эпюрам напряжений поперечной арматуры при опирании на жесткие (рис. 9, а – в) и податливые (рис. 9, г – е) опоры.

На диаграммах (рис. 6–8) прослеживается увеличение времени сопротивления наклонных сечений конструкций, испытанных на податливых опорах (50 мс), по отношению к образцам на жестких опорах (15 мс) в 2,5–3 раза, что говорит о более пластичной работе наклонного сечения, причем данное наблюдение справедливо для всех уровней продольного обжатия.

При испытании образцов на податливых опорах (рис. 6–8) в процессе динамического воздействия зафиксировано несколько характерных пиков на диаграммах опорных реакций, свидетельствующих об активной работе сминаемых вставок.

Характер реакции податливых опор на динамическое воздействие независим от уровня продольного обжатия и принципиально отличается от реакции опор конструкций, испытанных на жестких опорах (см. рис. 3, а, 4, 5).

Количественное изменение напряжений в поперечной арматуре наклонного сечения показано на рис. 9. При увеличении продольного обжатия до $N = 0,4N_{\max}$ напряжения в арматуре снизились в 2 раза. Причем данное наблюдение справедливо как для жесткого, так и для податливого опирания. Анализ влияния податливости опор показал, что при одинаковом уровне продольного обжатия снижение напряжений в поперечной арматуре составляет от 22 до 26 раз. Установлено, что наибольшие напряжения в поперечной арматуре

наклонных сечений возникают при испытании образцов на жестких опорах без продольного обжатия 224 МПа (рис. 9, а), а наименьшие – при испытании на податливых опорах с уровнем продольного обжатия $N = 0,4N_{\max}$, составляющие 4,8 МПа (рис. 9, е).

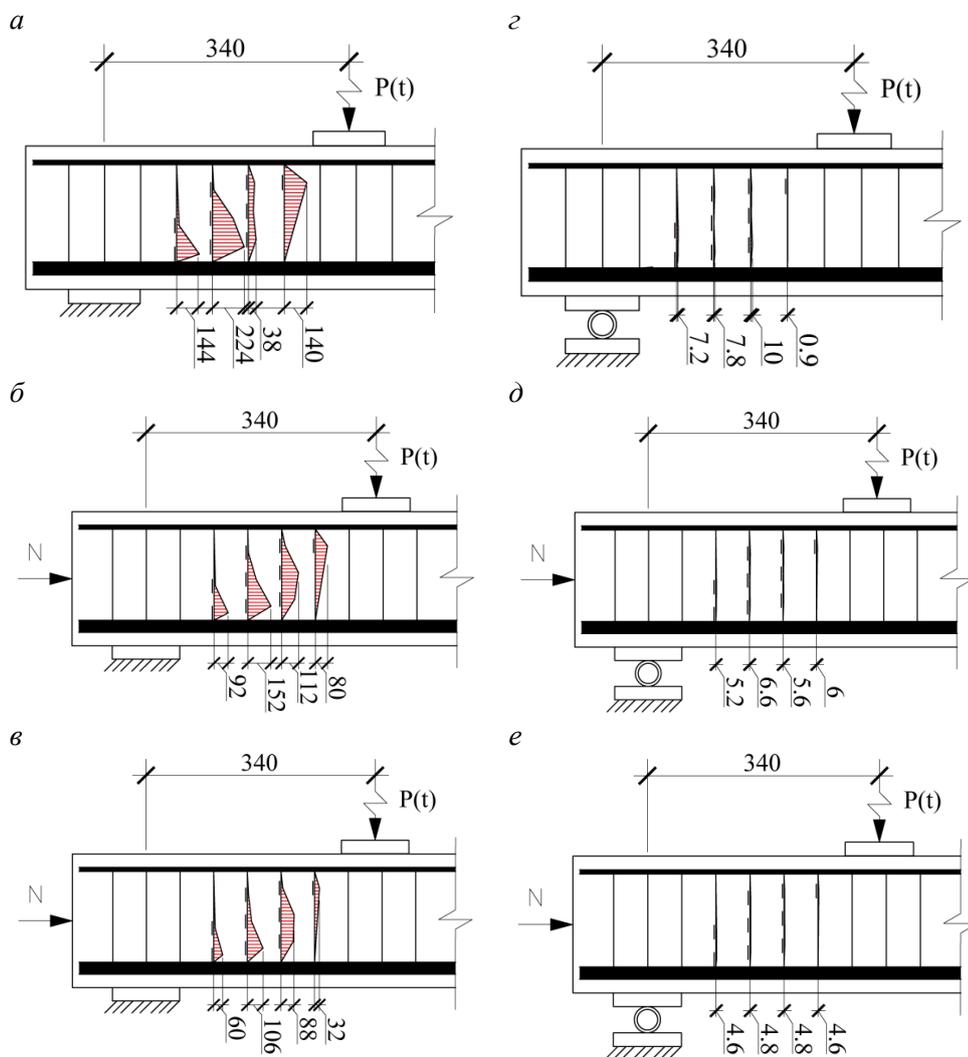


Рис. 9. Напряжения в поперечной арматуре (МПа), в пролете среза при разном уровне продольного обжатия на жестких и податливых опорах:

а – БДЖ-0; б – БДЖ-02; в – БДЖ-04; г – БДУП-0; д – БДУП-02; е – БДУП-04

Выводы

Экспериментальными исследованиями сжато-изгибаемых железобетонных конструкций при податливом опирании установлено, что величина опорной реакции при увеличении уровня продольного обжатия возрастает. При

испытании железобетонных элементов с продольным обжатием деформативность наклонных сечений существенно снижается, независимо от вида опирания (жесткое; податливое). При этом для конструкций на податливых опорах значения деформаций в поперечной арматуре и бетоне наклонного сечения резко снижаются, а время сопротивления образцов увеличивается, т. е. динамическое деформирование изгибаемой конструкции с продольным обжатием по наклонным сечениям происходит более пластично. Это свидетельствует о повышении энергоемкости системы «конструкция – податливая опора» и резерве ее динамической прочности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кумпяк, О.Г. Прочность сжато-изгибаемых железобетонных конструкций по наклонным сечениям на податливых опорах при динамическом нагружении / О.Г. Кумпяк, Н.В. Мещеулов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2014. – № 6. – С. 70–80.
2. Poonaya, S. An Analysis of Collapse Mechanism of Thin-Walled Circular Tubes Subjected to Bending / S. Poonaya, C. Thinvongpituk, U. Teeboonma // Proceedings of WASET. – 2007. – № 26. – P. 329–334.
3. Constitutive and geometric nonlinear models for the seismic analysis of rc structures with energy dissipators/ P. Mata, A. Barbat, S. Oller, R. Boroschek // Arch. comput. methods eng. – 2008. – № 15. –P. 489–539.
4. Olabi, A. Metallic tube type energy absorbers: A synopsis / A. Olabi, E. Morris, M, Hashmi // Journal of Thin-Walled Structures. – 2008. – № 45. – P. 706–726.
5. Marzbanrad, J. An energy absorption comparison of square, circular, and elliptic steel and aluminum tubes under impact loading / J. Marzbanrad, M. Mehdikhanlo, A. Saeedi Pour // Turkish J. Eng. Env. Sci. – 2009. – № 33. –P. 159–166.
6. Kumpyak, O.G. Strength of concrete structures under dynamic loading / O.G. Kumpyak, Z.R. Galyautdinov, D.N. Kokorin // Advanced Materials in Technology and Construction : II All-Russian Scientific Conference of Young Scientists. – 2015. –№ 1698.
7. 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. – № 96. – P. 88–99.
8. Расторгуев, В.С. Применение динамических гасителей колебаний при взрывных воздействиях / В.С. Расторгуев // Строительная механика и расчет сооружений. – 2009. – № 1. – С. 50–57.
9. 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 Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2016. –272 с.
10. Добромыслов, А.Н. Примеры динамических расчетов железобетонных сооружений / А.Н. Добромыслов. – М.: Изд-во АСВ, 2013. – 223 с.

REFERENCES

1. Kumpyak O.G., Meshcheulov N.V. Prochnost' szhato-izgibaemykh zhelezobetonnykh konstruktstii po naklonnym secheniyam na podatlivykh oporakh pri dinamicheskom nagruzhении [Oblique-section compressive and flexural strength of yield-supported concrete structures under dynamic load]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2014. No. 6. Pp. 70–80. (rus)
2. Poonaya S., Thinvongpituk C., Teeboonma U. An Analysis of collapse mechanism of thin-walled circular tubes subjected to bending. *Proceedings of WASET*. 2007. No. 26. Pp. 329–334.
3. Mata P., Barbat A., Oller S., Boroschek R. Constitutive and geometric nonlinear models for the seismic analysis of RC structures with energy dissipators. *Arch. Comput. Methods Eng*. 2008. No. 15. Pp. 489–539.

4. Olabi A., Morris E., Hashmi M. Metallic tube type energy absorbers: A synopsis. *Journal of Thin-Walled Structures*. 2008. No. 45. Pp. 706–726.
5. Marzbanrad J., Mehdikhanlo M., Saeedi Pour A. An energy absorption comparison of square, circular, and elliptic steel and aluminum tubes under impact loading. *Turkish J. Eng. Env. Sci.* 2009. No. 33. Pp. 159–166.
6. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Kokorin D.N. Strength of concrete structures under dynamic loading. *Proc. 2nd All-Rus. Sci. Conf. Young Scientists 'Advanced Materials in Technology and Construction'*. 2015. No. 1698.
7. 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. No. 96. Pp. 88–99.
8. Rastorguev V.S. Primenenie dinamicheskikh gasitelei kolebanii pri vzryvnykh vozdeistviyakh [Application of dynamic vibration dampers under explosion loads]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii*. 2009. No. 1. Pp. 50–57. (rus)
9. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Kokorin D.N. Prochnost' i deformativnost' zhelezobetonnykh konstruksii na podatlivykh oporakh pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhenii [Strength and deformability of reinforced concrete structures on yielding supports at dynamic loading]. TSUAB Publ., 2016. Pp. 149–246. (rus)
10. Dobromyslov A.N. Primery dinamicheskikh raschetov zhelezobetonnykh sooruzhenii [Examples of dynamic analysis of reinforced concrete structures]. Moscow: ASV Publ., 2013. Pp. 58–65. (rus)