

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГОПОГЛОТИТЕЛЯ КОЛЬЦЕВОГО ТИПА НА ЗНАКОПЕРЕМЕННЫЕ НАГРУЗКИ

Геннадий Ажермачев, Азиз Абдурахманов, Эльмар Меннанов

Национальная академия природоохранного и курортного строительства  
Адрес: Украина, 95493, г. Симферополь, ул. Киевская, 181. e-mail: www.napks.edu.ua

**Аннотация.** В работе представлены результаты физических экспериментальных исследований модели энергопоглотителя кольцевого типа с использованием тензометрического оборудования. Моделировалась ячейка связевого каркаса, которая нагружалась горизонтальной знакопеременной нагрузкой.

**Ключевые слова:** сейсмостойкость, связи, деформации, энергопоглотитель, экспериментальные исследования

Эффективным способом повышения сейсмостойкости многоэтажных зданий и сооружений является установка в систему вертикальных связей по колоннам каркасов специальных элементов, работающих при землетрясениях расчетной интенсивности в упругопластической стадии, так называемых энергопоглотителей. Работая за пределом упругости материала на знакопеременные циклические нагрузки, элементы поглощают большое количество энергии сейсмических воздействий, что обеспечивает затухание колебаний каркасов, уменьшение сейсмических нагрузок, снижение металлоемкости конструкций и затрат на антисейсмические мероприятия [1, 2, 3, 4, 13].

Как показали результаты теоретических исследований [5, 6], неупругая работа энергопоглотителей кольцевого типа (ЭПК) характеризуется существенной нелинейностью и повышенным энергопоглощением. В процессе упругопластического деформирования, ЭПК значительно изменяет свою мгновенную жесткость. Таким образом, использование кольцевых энергопоглотителей в качестве системы сейсмозащиты должно повысить сейсмостойкость зданий и сооружений как за счет их высокой энергоемкости, так и за счет отстройки динамических характеристик, что подтверждается результатами расчетов. Целью экспериментальных исследований является изучение особенностей рабо-

ты кольцевого энергопоглотителя. Его модель представляет собой фрагмент связевого каркаса. Модель выполнена в виде рамы, с размерами пролета  $L$  и высоты  $H$  1 м и 1 м, с шарнирными соединениями в узлах, в которой устанавливались связи, оснащенные кольцевыми энергопоглотителями различных типов.

Экспериментальные исследования модели проводились на специальном стенде знакопеременной циклической нагрузкой (см. рис. 1а). Нагружение осуществлялось натяжным устройством в уровне верхнего узла рамы. Для регистрации величины нагрузок устанавливались динамометры ДОСМ-3, которые были протарированы на испытательной установке Р-20 (рис. 1б).

Имеющиеся сведения [7] об идентичности кривых петель гистерезиса, полученных при статических испытаниях, с кривыми петель гистерезиса, полученными при динамических испытаниях, а также результаты работ [8, 9, 10], свидетельствующие о том, что энергоемкость при квазистатическом способе нагружения меньше, чем при динамическом нагружении, и может быть принята в качестве гарантированного минимума энергоемкости, которым обладает конструкция, определили выбор квазистатического способа нагружения с помощью тягового и толкающего устройства.

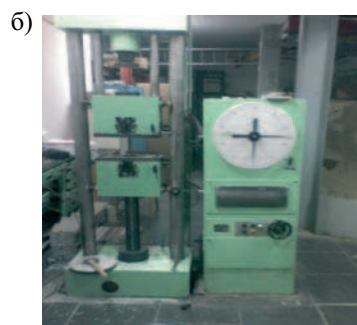
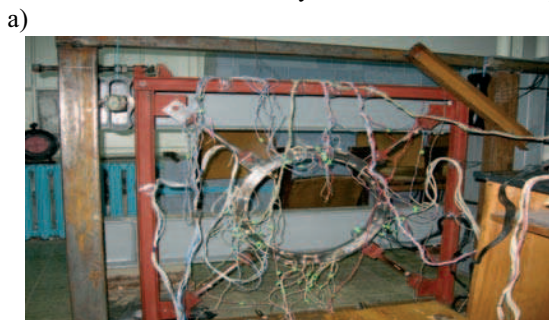


Рис. 1. Испытательные установки

а) экспериментальная установка; б) испытательная установка Р-20

Fig. 1. Equipment for tests

а) experimental setting; б) proof-of-concept setting P-20

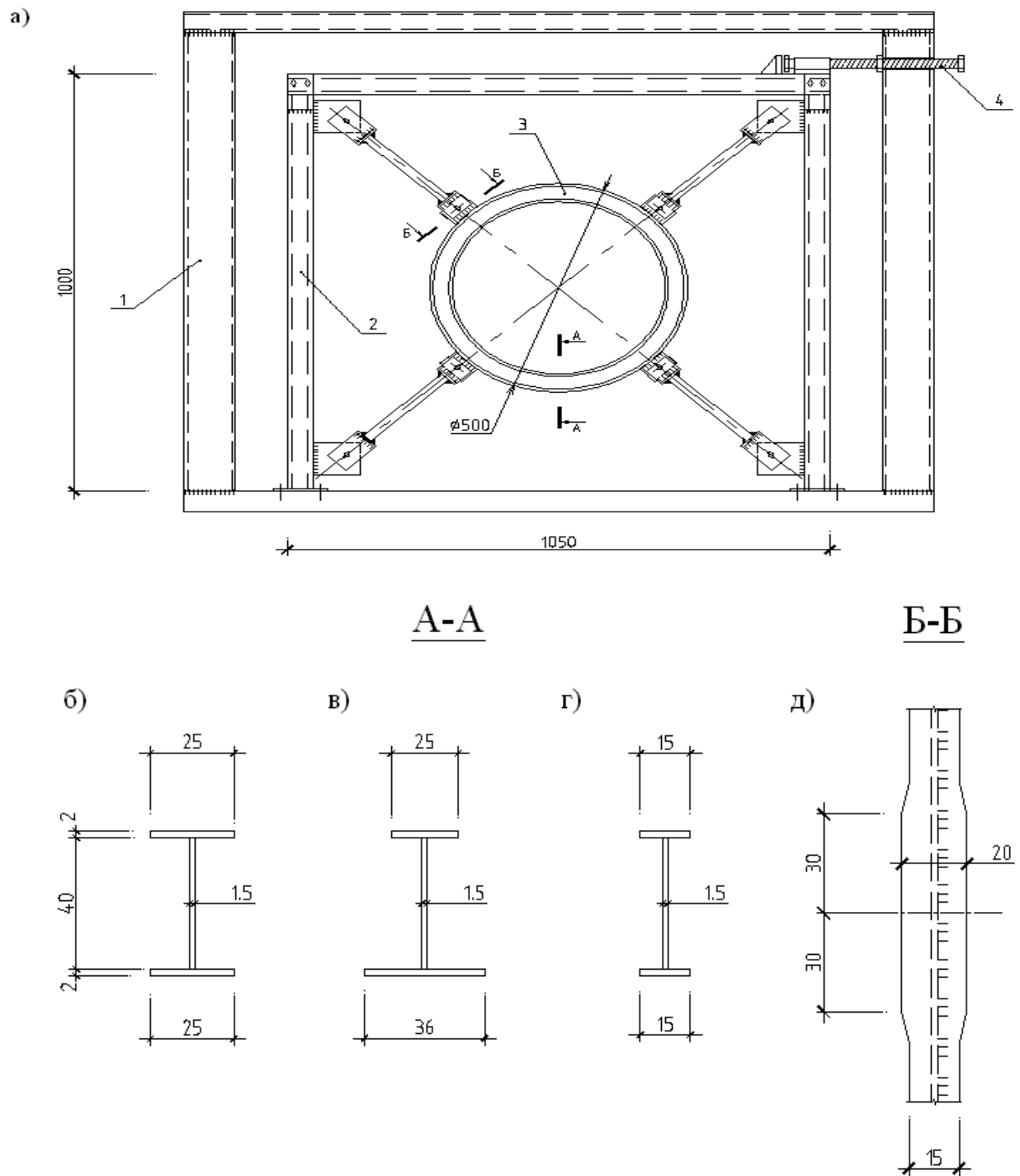


Рис. 2. Конструкция модели ЭПК и его сечения

а) модель ЭПК; б) тип В – базовый; в) тип N – несимметричный; г) тип U – с зонами равного сопротивления

Fig. 2. Construction of model circular energy absorber and his section:

a) model circular energy absorber; б) type B – base; в) type N – asymmetrical; г) type U – with the areas of equal resistance

Для изучения влияния геометрических параметров ЭПК выбрано три типоразмера двутаврового сечения колец: В – симметричные пояса двутавра (базовый), N – с несимметричными поясами двутавра (несимметричный), Z – с зонами равного сопротивления (рис. 2).

Описанное устройство модели ЭПК позволяет:

- производить замену колец;
- варьировать их геометрические параметры;
- оснащать различными измерительными приборами (динамометры, индикаторы часового типа).

Кольца изготавливались из стали С345. Перед началом основного этапа экспериментальных исследований, на разрывной машине в соответствии с ГОСТ 1497-84 была испытана серия стандартных образцов.

Экспериментальные исследования всех конструктивных элементов и узлов проводились по плану, составленному в соответствии с теорией оптимального планирования факторных экспериментов [11]. Это позволило повысить надежность результатов, использовать дисперсионный анализ и методы математической статистики при обработке данных.

Нагрузка прикладывалась ступенями с десятиминутной выдержкой [12]. Из представленной на рис. 3 зависимости между силой на кольцо и его деформациями видно, что при таком виде нагружения зависимость образует устойчивые петли гистерезиса. Характер зависимости позволяет выделить две отчетливо выраженные стадии работы энерго-

поглотителя: упругую и упругопластическую. Упругая работа наиболее четко проявляется на разгрузочных, а неупругая на загрузочных ветвях петли.

В первом полупериоде зависимость имеет ломаный вид и сопровождается развитием пластических деформаций. При этом перемещения рамы превосходят значения полученные теоретическим (численным) путем (таблица 1). В последующих полупериодах зависимость приобретает более плавное очертание и после некоторого роста деформативности во втором и третьем полупериодах, к четвертому и пятому выходит на достаточно близкий к расчетным значениям, почти симметричный режим деформирования. Такой характер работы связан, по видимому, с неоднородностью макрокристаллической структуры стали. Более высокая, по сравнению с расчетами, деформативность ЭПК является нежелательным фактором. Тем не менее, она обуславливает большую энергоемкость, что в свою очередь повышает надежность кольцевых энергопоглотителей.

В процессе развития неупругих деформаций ЭПК, значительно изменяются его жесткостные характеристики. Жесткость для конца первого полупериода снизилась по отношению к первоначальной в 5 раз.

Данное обстоятельство должно приводить к существенному изменению динамических характеристик систем, оснащенных ЭПК

Таблица 1. Результаты испытаний ЭПК с базовым кольцом  
Table 1. Results of tests of circular energy absorber with a base ring

N полуцик- ла	Наг- руз- ка, кгс	Изменение диа- метра кольца, мм		Приведенная жесткость, Н/мм		Полуцикловая энерго- емкость, Дж		Коэффициент податливости $\alpha_n$
		теор.	опыт.	теор.	опыт.	теор.	опыт.	
1	900	8.4	10	1071	900	115	144	5.0
2	940	9	11	1044	854	126	169	5.5
3	940	9	11.5	1044	817	126	179	5.75
4	940	9	11.2	-	-	-	-	5.6
5	940	9	11.9	-	-	-	-	5.95

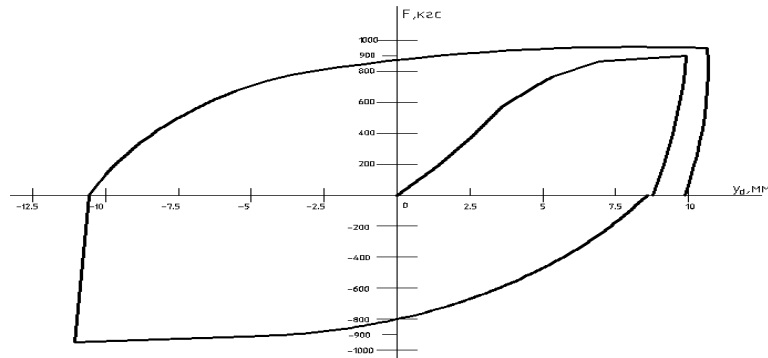


Рис. 3. Диаграмма деформирования для ЭПК с базовым кольцом  
 Fig. 3. Diagram of deformation for absorber with a base ring

На основании анализа процесса деформирования энергопоглотителя с базовым кольцом в течение 5 полуциклов, установлено, что статическая работа ЭПК достаточно полно может быть изучена и при двух полуциклах. В этой связи было принято решение испытания энергопоглотителя с N (несимметричный) и U (уширенный) кольцами ограничить тремя полуциклами знакопеременного нагружения.

На рис. 4 представлена диаграмма деформирования ЭПК с несимметричным сечением, в сравнении с диаграммой полученной теоретическим путем [5]. Ее характер полностью аналогичен зависимости, рассмотренной выше. Полуторкротное увеличение внутреннего пояса привело к упругой его работе и увеличению объема металла внешнего пояса, работающего в упругопластической стадии и за счет этого увеличению деформативности, чем у базового кольца. Как и в предыдущем случае, фактическая энергоемкость энергопоглотителя превосходит расчетную (в 1.2 раза).

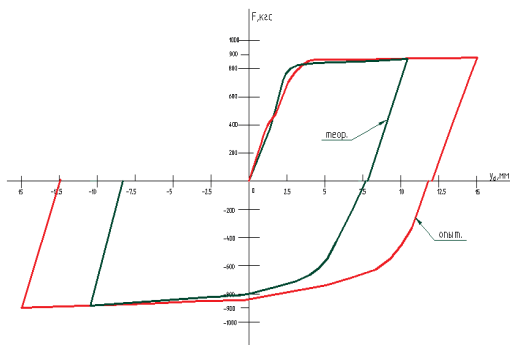


Рис. 4. Диаграмма деформирования для ЭПК с несимметричным сечением кольца  
 Fig. 4. Diagram of deformation for absorber with the asymmetrical section of ring

Сопоставление разгрузочных ветвей ЭПК с несимметричным и уширенным сечением кольца (рис. 5 и табл. 2) подтверждает их практически равные жесткости в упругой стадии. Создание зон равного сопротивления приводит к еще большему росту деформативности энергопоглотителя в упругопластической стадии (в 1.6 раза), хотя в упругой стадии первого полуцикла расхождение между деформированием уширенного и несимметричного кольца было незначительным. За счет более высокой деформативности, энергоемкость U-колец в 1.7 раза превосходит аналогичный параметр N-кольца и в 2.2 раза энергоемкость B-кольца (табл.2). Деформации ЭПК с зонами равного сопротивления в первом полуцикле оказались значительно больше расчетных. Как и в предыдущих случаях, энергоемкость U-кольца также оказывается больше теоретической, а его неупругая работа приводит к снижению жесткости энергопоглотителя почти в 10 раз.

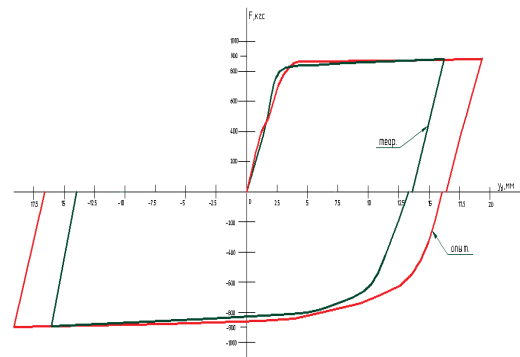


Рис. 5. Диаграмма деформирования для ЭПК с зонами равного сопротивления  
 Fig. 5. Diagram of deformation for absorber with the areas of equal resistance

Таблица 2. Сравнение результатов испытаний ЭПК с 3-мя типами колец  
Table 2. Comparing of results of tests for absorber with three types of rings

Типоразмер	Изменение диаметра кольца в 1-м полуцикле $\Delta$ , мм		Максимальная нагрузка в 1-м полуцикле $P_{1max}$ , кгс	Жесткость в упругой стадии, Н/мм		Приведенная жесткость для 1-го полуцикла, Н/мм		Энергоемкость в 1-м полуцикле, Дж		Коэффициент податливости
	теор.	опыт.		теор.	опыт.	теор.	опыт.	теор.	опыт.	
Базовый	8.4	10	900	4780	4500	1071	900	115	144	5.0
Несимметричный	10.3	12.2	892	4462	4460	866	731	149	184	6.1
Уширенный	16.2	19.4	895	4478	4475	552	461	256	313	9.7

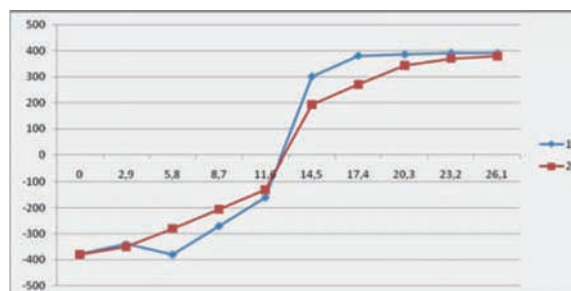


Рис. 6. График распределения напряжений по длине ЭПК уширенного типа (график 1) и базового типа (график 2).  
Fig. 6. Chart of distributing of tensions on length of for absorber with a megascopic width (chart 1) and base type (chart 2).

Из рисунка 6 видно, что пластические деформации в уширенном кольце распределены практически по всей длине кольца, чем у базового, тем самым вовлекая в упругопластическую работу больший объем металла.

### ВЫВОДЫ

1. Экспериментально подтверждена нелинейность упругопластической работы энергопоглотителя кольцевого типа, причем, при симметричном циклическом режиме нагружения образуются устойчивые петли гистерезиса;
2. Реальная деформативность ЭПК в первом полуцикле превышает расчетную, что должно быть учтено при подборе геометрических параметров;
3. В процессе развития неупругих деформаций значительно изменяются жесткостные характери-

стики энергопоглотителя (для N-кольца в 6.1 раза, для U-кольца в 9.7 раза).

4. Экспериментальные значения полуцикловой энергоемкости для всех типоразмеров колец превосходят расчетные значения;

5. За счет создания зон равного сопротивления в упругопластическую работу вовлекается больший объем металла, что приводит к существенному увеличению энергоемкости кольца.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Поляков В. и др., 1989.: Современные методы сейсмозащиты зданий. – М.: Стройиздат. – 320.
2. Корчинский И., Бородин Л., Остриков Г., 1976.: Конструктивные мероприятия, обеспечива-

ющие повышение сохранности каркасов зданий во время землетрясений.// Строительство и архитектура Узбекистана. – №3, 39 – 42.

3. Остриков Г., Максимов Ю., 1985.: Стальные сейсмостойкие каркасы многоэтажных зданий. – Алма-Ата: Казахстан. – 120.

4. А. с. СССР № 754005, 1980.: Каркас сейсмостойкого многоэтажного здания / Новиков В. Л., Остриков Г. М. – БИ №29.

5. Ажермачев Г., Абдурахманов А., 2011.: Работа кольцевого энергопоглотителя при знакопеременном циклическом нагружении.// Сб. науч. тр. «Строительство и техногенная безопасность». – Симферополь: НАПКС. – Вып. 35., 124–131.

6. Agermachev G., Abdurakhmanov A., Menjanov E., 2009. The application of energy absorbers in dynamic systems// MOTROL. - №11A, 59 – 63.

7. Hanson R., 1966.: Comparison of Static and Dynamic Hysteresis Curves/ / Jour. of the Engineering Mechanics Divisions, ASCE. – Vol. 92, № EM5, Paper 4949, October, 76 – 82.

8. Влияние скорости нагружения на несущую способность железобетонных балок., 1976 // Реф. информ. «Сейсмостойкое строительство». – М.: ЦИНИИС. – сер. XIV, вып. 7, 43 – 48.

9. Корчинский И., Ржевский В., 1966.: Исследование прочности железобетонных конструкций при действии нагрузок типа сейсмических// «Бетон и железобетон». – №1, 35 - 42.

10. Ржевский В., Аванесов Г., 1978.: Несущая способность железобетонного каркаса с энергетических позиций при динамическом воздействии.// Реф. информ. «Сейсмостойкое строительство». – М.: ЦИНИИС. – сер. XIV, вып. 2.

11. Адлер Ю. и др., 1976.: Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука. – 226.

12. Долидзе Д., 1975.: Испытания конструкций и сооружений. – М.: Высшая школа. – 252.

13. Меннанов Э., 2010. К вопросу надежности и долговечности сварных соединений строительных конструкций// MOTROL. -№ 12D, 160 – 165.

#### EXPERIMENTAL RESEARCH OF RING-TYPE ENERGY ABSORBER BY THE ALTERNATING LOADS

**Summary.** The results of physical experimental research of ring-type energy absorber with usage of tensiometric equipment are represented in the article. The braced framing's cell that was being loaded by the alternating load was modeled.

**Key words:** seismic resistance, linkages, deformations, energy absorber, experimental researches