

## **ВИБРОСЕЙСМОИЗОЛЯЦИЯ ЗДАНИЙ С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ ЭЛАСТОМЕРНЫХ БЛОКОВ**

Немчинов Ю.И., Марьенков Н.Г., Жарко Л.А., Марьенков А.Н.  
ГП «Научно-исследовательский институт строительных конструкций»  
г. Киев, Украина

Дырда В.И., Лисица Н.И., Агальцов Г.Н., Новикова А.В.  
Институт геотехнической механики НАН Украины  
г. Днепр, Украина

**АННОТАЦИЯ:** У роботі наведено результати експериментальних досліджень по визначенню статичних і динамічних характеристик (жорсткість на стиск, зсув, логарифмічний декремент, коефіцієнт дисипації з урахуванням конструкційного демпфірування) гумових блоків.

**АННОТАЦИЯ:** В работе приведены результаты экспериментальных исследований по определению статических и динамических характеристик сейсмозащитных опор (жёсткость на сжатие, сдвиг, логарифмический декремент, коэффициент диссипации с учётом конструкционного демпфирования).

**ABSTRACT:** The results of experimental studies to determine the static and dynamic characteristics (stiffness in compression, shear, logarithmic decrement, damping coefficient taking into account the structural damping) of seismic supports are given in the paper.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** жилые дома, вибросейсмозащитные резиновые опоры, уровни вибраций, жёсткость опор на сжатие и сдвиг, коэффициент снижения колебаний.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Обеспечение комфортного проживания в жилых домах, расположенных рядом с трассами метрополитена и железными дорогами, представляет серьезную техническую проблему. Также при строительстве зда-

ний и сооружений в районах, подверженных сейсмическим воздействиям, должна быть обеспечена их сейсмостойкость, то есть способность противостоять воздействию землетрясений [1].

Так, в зоне сейсмического риска Украины (землетрясения интенсивностью 6 и более баллов) находится более 10 млн. человек. Традиционные системы сейсмозащиты обеспечивают сейсмостойкость зданий и сооружений путем повышения несущей способности конструкций и их соединений, что способствует созданию более прочных, жестких и монолитных сооружений. При этом стоимость строительства увеличивается в зависимости от балльности строительной площадки.

Согласно нормам Украины ДБН В.1.1-12:2014 [2] и нормам европейских стран (Еврокод 8) разработан новый подход к обеспечению сейсмической безопасности зданий и сооружений, который заключается в снижении сейсмических нагрузок на здание вместо традиционного увеличения размеров сечений и армирования железобетонных конструкций. Одним из наиболее перспективных способов защиты является вибро- и сейсмоизоляция зданий и сооружений с помощью резинометаллических сейсмоблоков (РСБ). Данное направление широко используется в Японии, Китае, США, РФ, Новой Зеландии, Италии, Канаде. В Украине данное направление также получило развитие в связи с разработанными новыми нормами [2], положения которых по сейсмоизоляции основаны на результатах экспериментальных и теоретических исследований, а также опыте проектирования и строительства систем вибро- и сейсмоизоляции с использованием РСБ при строительстве 10-ти и 27-ми этажных жилых домов в г. Киеве.

Цель работы – получение и анализ экспериментальных данных по определению жесткостных и диссипативных характеристик РСБ при различных условиях нагружения, а также оценка снижения уровня вибраций плиты ростверка и перекрытий многоэтажных жилых домов при воздействиях поездов метрополитена.

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Испытаны четыре типа РСБ (рис. 1), которые разработаны Институтом геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины и Государственным предприятием «Государственный научно-исследовательский институт строительных конструкций», конструкции которых защищены патентами Украины.



а – сейсмозащитный блок 1-го типа (высота резиновых элементов  $2 \times 120$  мм, диаметр 400 мм); б – сейсмозащитный блок 2-го типа (высота резиновых элементов  $2 \times 70$  мм, диаметр 400 мм); в – сейсмозащитный блок 3-го типа (высота резиновых элементов  $2 \times 50$  мм, диаметром 480 мм и 500 мм)

Рис. 1. Экспериментальные конструкции РСБ

Испытания РСБ проводились в два этапа: сначала динамические – определение демпфирующих характеристик опор, а затем статические – определение жесткостных характеристик опор на сжатие и сдвиг.

При динамических испытаниях на четыре одинаковых РСБ устанавливался железобетонный блок (рис. 2) массой 5100 кг (для опор  $2 \times 70$  мм;  $2 \times 120$  мм и диаметром 400 мм), металлический короб массой 2850 кг (для опор  $2 \times 50$  мм и диаметром 480 мм), железобетонный блок массой 3400 кг (для опор  $2 \times 50$  мм и диаметром 500 мм).

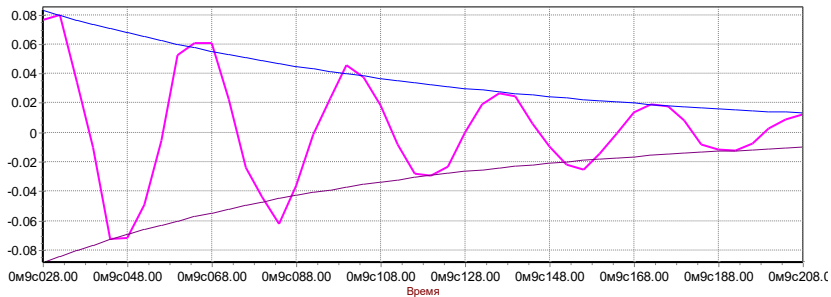


Рис. 2. Лабораторные динамические испытания РСБ

Колебания блоков в горизонтальной и вертикальной плоскостях задавались специальным устройством и регистрировались двухканальным спектроанализатором марки 2148 фирмы «Брюль и Кьер» (Дания) и 8-ми канальной системой сейсмомониторинга, разработанной в Украине. На основе экспериментальных записей сигналов виброускорений при свободных колебаниях блоков на РСБ (рис. 3) определены значения динамиче-

ской вертикальной и горизонтальной жесткостей и параметры затухания испытываемых РСБ. Полученные результаты приведены в табл. 1.

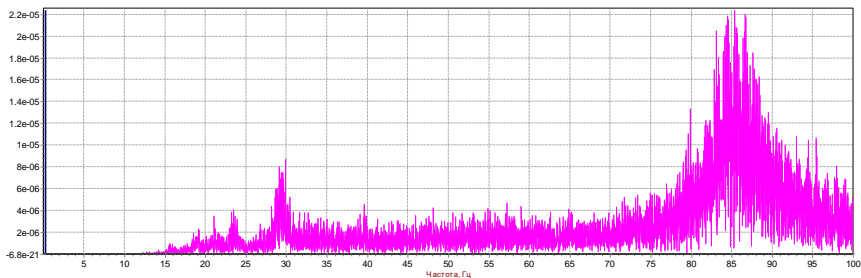
Тип	Вид	Ед. изм.	Част. диап.	К-во линий	Усредн.	Дата и время
ВР "р"	-	м/с2	0.3...100 Гц	30000	нет	19.03.2015 17:17:00



Логарифмический декремент (+) = 0.3556

Логарифмический декремент (-) = 0.4465

а – свободные колебания блока на четырех изоляторах  
диаметром 500 мм и толщиной 50 мм



б – спектр вертикальных виброускорений

Рис. 3. Примеры записи колебаний блоков на РСБ

## Результаты динамических испытаний РСБ

Динамические характеристики РСБ	Высота резинового элемента (количество)			
	120 мм (два)	70 мм (два)	50 мм (два) Ø480	50 мм (два) Ø500
Собственная частота бетонного блока в вертикальной плоскости, Гц	10,44	14,13	62,20	84,00
Собственная частота бетонного блока в горизонтальной плоскости, Гц	4,25	5,38	15,50	19,50
Динамическая жёсткость четырёх РСБ на сжатие, МН/м	22,37	40,90	520,00	793,00
Динамическая жёсткость на сжатие одного РСБ, МН/м	5,59	13,60	130,00	198,00
Динамическая жёсткость четырёх РСБ на сдвиг, МН/м	3,64	5,82	32,20	42,70
Динамическая жёсткость одного РСБ на сдвиг, МН/м	0,91	1,90	8,05	10,70
Логарифмический декремент колебаний бетонного блока на четырёх РСБ	0,42	0,38	0,28 – 0,30	0,30 – 0,35

Статические испытания выполнялись на специальном стенде [3], оборудованном гидравлическими домкратами для создания вертикальных и горизонтальных нагрузок. Нагружение осуществлялось ступенями по (50-300) кН в зависимости от типа опоры с выдержкой 5 мин. на каждой, после чего снимались показания вертикальных перемещений. Максимальная вертикальная нагрузка доводилась до 4000 кН. Измерения сдвиговых перемещений верха сейсмоопоры выполнялись при вертикальных нагрузках 300; 500; 600; 1000 кН. Для возможности горизонтальных перемещений сейсмоопоры на сдвиг при фиксированных вертикальных нагрузках между верхней пластиной опоры и нагрузочной плитой были установлены две фторопластовые пластины. При обработке данных учитывались изме-

нения коэффициента трения между пластинами в зависимости от вертикальной нагрузки.

Результаты статических испытаний блоков приведены в табл. 2.

С целью определения влияния свинцового сердечника на жесткостные и демпфирующие характеристики РСБ (резиновые элементы диаметром 500 мм) были проведены циклические испытания на сжатие и на сдвиг двух опор без свинцовых сердечников и двух – со свинцовыми сердечниками. Сердечники были изготовлены в виде сплошных цилиндров высотой 70 мм и диаметром 100 мм.

На рис. 4 приведены зависимости «горизонтальная нагрузка – перемещение» для РСБ со свинцовым сердечником (кривая 1) и без сердечника (кривая 2) при вертикальной нагрузке на опору 1000 кН.

На рис. 5 представлены зависимости «вертикальная нагрузка – перемещение» для РСБ диаметром 500 мм и высотой 2×50 мм. Кривая 1 – со свинцовым сердечником при номинальной нагрузке 1000 кН, кривые 2 и 3 – опора без свинцового сердечника при двух- и трехкратном превышении номинальной нагрузки.

Анализ рис. 5 показывает, что наличие свинцового сердечника существенно влияет на жесткостные и диссипативные характеристики РСБ на сдвиг.

Таблица 2

Результаты статических испытаний

Характеристика	Значение жёсткости, МН/м			
	опоры			
	2×120 мм, Ø400 мм	2×70 мм, Ø400 мм	2×50 мм, Ø480 мм	2×50 мм, Ø500 мм
Средняя жёсткость на сжатие при нагрузке:				
200 кН	4,9	–	–	–
300 кН	–	15,8	–	–
1200 кН	–	–	100,0	–
1500 кН	–	–	113,0	–
1000 – 1600 кН	–	–	–	180,0
1600 – 2000 кН	–	–	–	200,0
Средняя жёсткость на сдвиг при нагрузке:				
12,5 – 37,0 кН	1,3	–	–	–
25,0 – 50,0 кН	–	1,4	–	–
500,0 – 600,0 кН	–	–	6,2	8,2
1000 кН	–	–	–	10,0

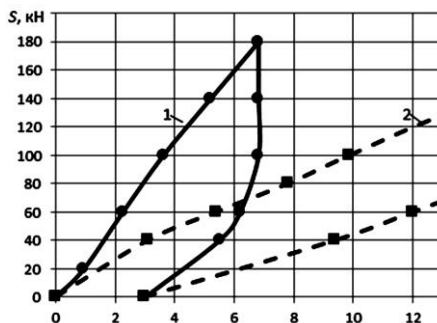


Рис. 4. Зависимости «горизонтальная нагрузка – перемещение» для РСБ диаметром 500 мм

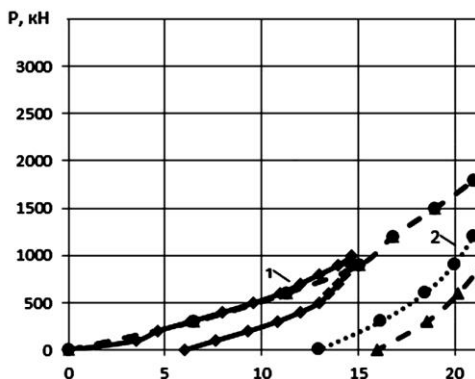


Рис. 5. Зависимости «вертикальная нагрузка – перемещение» для РСБ диаметром 400 мм

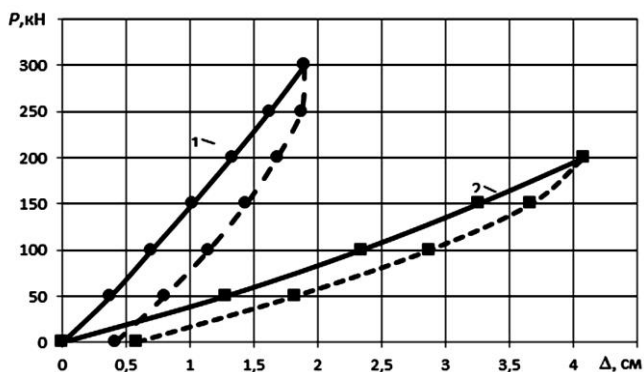


Рис. 6. Зависимости «вертикальная нагрузка – перемещение» при различном исполнении средней пластины РСБ

Для оценки влияния буртиков металлических пластин на жесткостные и демпфирующие характеристики РСБ были выполнены испытания двух образцов опор: при наличии средней металлической пластины с буртиками и при средней пластине без буртиков (гладкая пластина). На рис. 6 приведены зависимости «вертикальная нагрузка – перемещение» при средней пластине с буртиками (кривая 1) и гладкой средней пластине (кривая 2). Анализ кривых показывает, что наличие буртиков на средней пластине приводит к увеличению вертикальной жесткости.

Кроме того, в соответствии с требованиями стандарта ISO и европейского стандарта для определения состояния конструкции РСБ при вертикальных максимальных нагрузках, превышающих проектные в 4 раза,

один образец РСБ (вариант со средней рифлёной пластиной без кольца и без сердечника) был испытан циклическими вертикальными нагрузками на прессе по такой специальной программе: 3 полуцикла «нагрузка - разгрузка» ступенями по 300 кН (выдержка на каждой ступени 5 минут) до 3000 кН; 2 полуцикла «нагрузка - разгрузка» ступенями по 500 кН (выдержка на каждой ступени 2 минуты) до 5000 кН; 1 полуцикл «нагрузка - разгрузка» ступенями по 1000 кН (выдержка на каждой ступени 5 минут) до 9000 кН.

При сжимающих многоцикловых нагрузках от 3000 кН до 9000 кН после полной разгрузки РСБ в течение 10 минут резиновые элементы полностью принимали первоначальную форму. При этом трещины ни в одном из двенадцати испытанных резиновых элементов не обнаружены.

## **ОПЫТ ВИБРО- И СЕЙСМОЗАЩИТЫ 27-МИ ЭТАЖНОГО ЖИЛОГО ДОМА ПО ПРОСПЕКТУ ОБОЛОНСКОМУ В Г. КИЕВЕ ОТ ПОЕЗДОВ МЕТРОПОЛИТЕНА, АВТОТРАНСПОРТА И ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ИНТЕНСИВНОСТЬЮ 6 БАЛЛОВ**

27-этажный жилой дом запроектирован с несущими монолитными железобетонными стенами и перекрытиями. Перекрытия этажей – монолитные железобетонные плиты, которые объединяют вертикальные элементы (ядра жесткости, диафрагмы и колонны) и также обеспечивают пространственную жесткость здания в целом. Фундамент здания – монолитная железобетонная плита на свайном основании (рис. 7).

В проектируемом здании предусмотрено подвальный этаж высотой 2,8 м; первый этаж – 3,6 м; типовой этаж – 3,0 м.

Вертикальные монолитные диафрагмы жесткости приняты по проекту толщиной 300 мм; стены ядра жесткости (лестнично-лифтовой блок) и плиты перекрытий имеют толщину 200 мм.

Несущие железобетонные монолитные стержневые конструкции имеют следующие поперечные сечения:

- ригели 15x30 см и 30x120 см;
- колонны, расположенные на верхнем этаже, 30x30 см.

Плита ростверка имеет толщину 1200 мм и опирается на железобетонные сваи диаметром 620 мм. Для защиты от воздействий поездов метрополитена по результатам исследований расчетным путем и проведения испытаний резиновых виброизоляторов, на оголовках каждой сваи перед бетонированием плиты ростверка устанавливается изолятор и выполняются работы по устройству системы виброзащиты здания на уровне подошвы плиты ростверка.



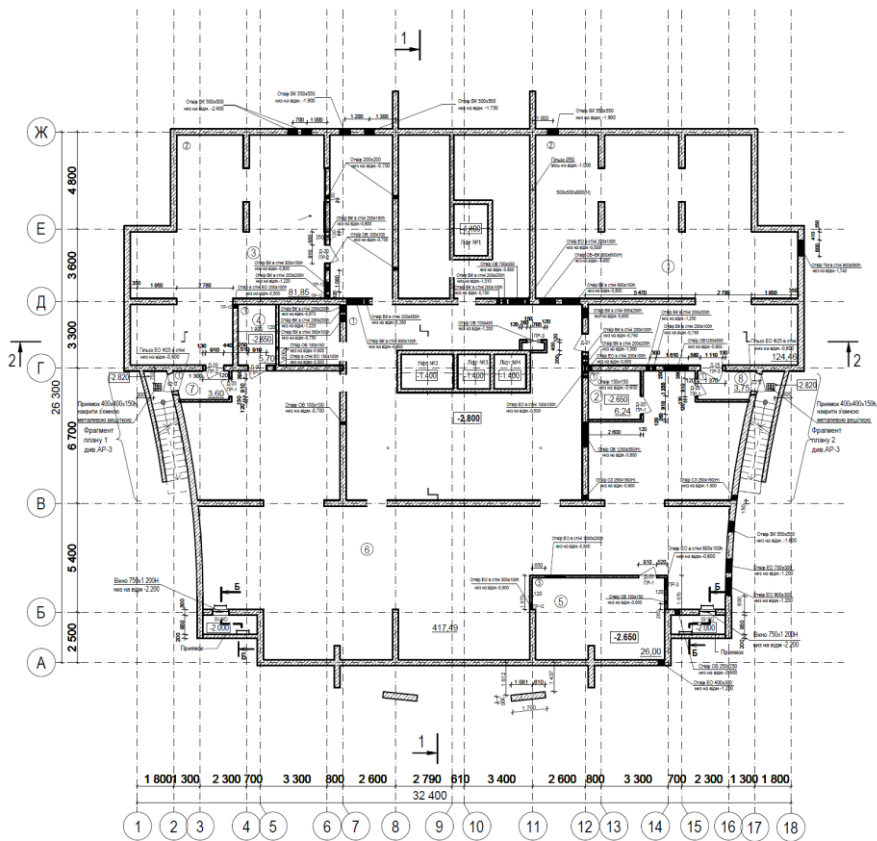


Рис. 7. План подвала секции №1

## РАСЧЕТНЫЕ УСИЛИЯ В ВИБРОИЗОЛЯТОРАХ И КОЭФФИЦИЕНТЫ ЗАПАСА ПО ОПРОКИДЫВАНИЮ ЗДАНИЯ ПРИ ВЕТРОВЫХ НАГРУЗКАХ

Экстремальные значения расчетных усилий резиновых виброизоляторов приведены в табл. 3.

Номера конечных элементов с максимальными усилиями и расположение виброизоляторов на плане свайного поля секции №1 жилого дома приведены на рис. 8.

Таблица 3

Экстремальные значения расчетных усилий резиновых виброизоляторов

Критерий поиска	№ элемента	Усилия, тс		№№ загружений
		горизонтальные	вертикальные	
<b>Rxy, min</b>	10133	0.007	-184.388	1 2
<b>Rxy, max</b>	10260	0.835	-268.967	1 2 3 4
<b>Rz, min</b>	10277	0.767	-275.413	1 2 3 5
<b>Rz, max</b>	10165	0.334	-157.381	1 4

Примечание: Загружения 1, 2 и 3 – вертикальные статические (соответственно, постоянные, длительно действующие и кратковременные); 4 и 5 – ветровые статические вдоль оси X и Y, соответственно).

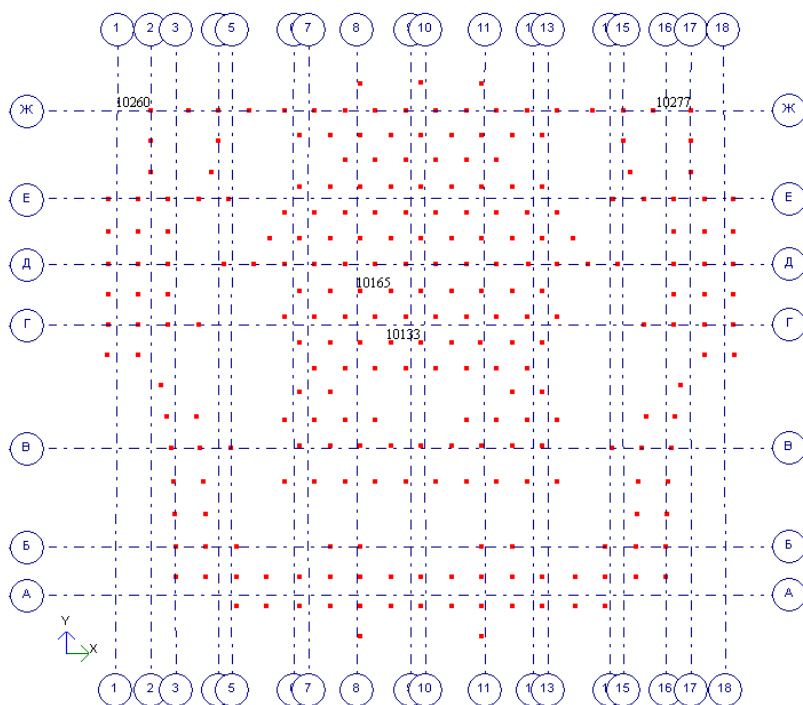


Рис. 8. Расположение виброизоляторов с экстремальными усилиями в расчетной схеме здания при основных сочетаниях нагрузок

Коэффициент запаса здания секции №1 по опрокидыванию при ветровых нагрузках определяется по формуле:

$K_{опр} = M_{уд} / M_{опр}$ ,

где  $M_{уд}$  – минимальный удерживающий момент от постоянной нагрузки относительно крайнего ряда виброизоляторов;

$M_{опр}$  – максимальный опрокидывающий момент от ветровых нагрузок.

Относительно расчетной модели секции №1 минимальный удерживающий момент: вокруг оси X  $M_x = 636114$  т·см; вокруг оси Y  $M_y = 771175$  т·см.

Максимальные опрокидывающие моменты от ветровых нагрузок : вокруг оси X  $M_x = 5967$  т·см; вокруг оси Y  $M_y = 5177$  т·см. При этом коэффициент надежности по опрокидыванию вокруг оси X:  $K_{опр} = 636114 / 5967 = 107$ ; вокруг оси Y:  $K_{опр} = 771175 / 5177 = 149$ .

Общий вид системы вибро- и сейсмозащиты (в уровне свайного ростверка) построенного 27-ми этажного жилого дома в г. Киеве возле линии метрополитена приведен на рис. 9.



Рис. 9. Общий вид системы виброзащиты высотного здания на Оболонском проспекте в г. Киеве (резиновые виброизоляторы диаметром 500 мм установленные на оголовках свай диаметром 620 мм)

При строительстве двух жилых домов на Оболонском проспекте г. Киева выполнялись работы в течение 2014-2016 гг. ГП НИИСК и Институтом геотехнической механики (ИГТМ) НАН Украины по научно-техническому сопровождению проектирования и строительства.

## РЕЗУЛЬТАТЫ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СТРОИТЕЛЬСТВА

Результаты анализа данных динамических обследований (проведены в 2015-2016 гг.) монолитной плиты ростверка, перекрытий над 1, 5, 10, 15 и 25-м этажами возведенной 27-ми этажной секции №1 жилого дома показали, что применение системы виброзащиты от метрополитена позволило достигнуть снижения уровней вибрации в жилых помещениях на 7...12 дБ (в 2...4 раза). Зарегистрированные уровни вибраций перекрытий не превышают допустимые по Санитарным нормам Украины [4], что обеспечивает комфортные и безопасные условия проживания людей в высотных домах, расположенных на расстоянии 20...30 м от трассы метрополитена мелкого заложения.

### ВЫВОДЫ

1. Разработанные в Украине системы сейсмоизоляции зданий на основе запатентованных высокодемпфирующих сейсмоизолирующих блоков обеспечивают снижение динамической и сейсмической реакции конструкций (нагрузок и амплитуд колебаний этажей зданий), что позволяет проектировать экономичные здания с заданным уровнем обеспечения сейсмостойкости и комфортных условий проживания в соответствии с требованиями отечественных и Европейских норм. Расчётный экономический эффект составляет на одно здание высотой от 9 до 16 этажей от 300 до 700 тысяч грн. (данные предварительных расчётов лаборатории экономических исследований НИИСК).

2. Анализ результатов экспериментальных исследований показывает:

а) отношение жёсткости на сжатие к жёсткости на сдвиг РСБ увеличивается с уменьшением толщины резинового слоя и увеличением диаметра резиновых элементов;

б) жёсткость РСБ на сдвиг увеличивается с ростом вертикальной нагрузки;

в) логарифмический декремент колебаний уменьшается с уменьшением высоты резинового слоя;

г) обобщённые коэффициенты диссипации РСБ (с учётом конструкционного демпфирования) составляют 0,39...0,74 в зависимости от типа опор и условий нагружения.

3. Разработанные, испытанные и запатентованные [5] конструкции РСБ были использованы для вибро- и сейсмозащиты жилых домов в г. Киеве (10-ти секционного 10-ти этажного по ул. Киквидзе и двух 27-ми этажных на Оболонском проспекте, расположенных на линиях глубокого и

мелкого заложения метрополитена), что позволило достигнуть снижения уровней вибрации в жилых помещениях на 7-12 дБ (в 2-4 раза). Следует отметить, что разработанные конструкции РСБ могут быть также использованы для защиты зданий и сооружений от сейсмических нагрузок интенсивностью 6...9 баллов, от воздействий железнодорожного и автомобильного транспорта, а также для виброизоляции фундаментов, машин и оборудования с динамическими нагрузками.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Немчинов Ю.И. Сейсмостойкость зданий и сооружений: в 2-х частях / Ю.И. Немчинов. – Киев, 2008. – 480 с.
2. Будівництво у сейсмічних районах України: ДБН В.1.1 – 14:2014. - [Чинні від 2014-10-01]. – К.: Мінрегіон України, 2014. - VI, – 110 с. – (Будівельні норми України).
3. Экспериментальные исследования систем сейсмоизоляции зданий на основе резинометаллических сейсмозащитных блоков / [А.Ф. Булат, В.И. Дырда, Ю.И. Немчинов и др.] // Геотехническая механика: межвед. сб. научн. тр. Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины. – Днепрпетровск, 2012. – Вып. 106. – С. 30-37.
4. Містобудування. Планування і забудова міських і сільських поселень: ДБН 360-92\*\*. –К.: Державний комітет будівництва, архітектури та житлової політики України, 1992. – II, 108 с. – (Будівельні норми України).
5. Пат. № 58418 Україна. Антисейсмічна опора / Дирда В.І., Немчинов Ю.І., Лисиця М.І., Мар`єнков М.Г. та ін. - №\_58418; заявл. 30.09.2010; дата публ. 11.04.2011, бюл. № 7.

Статья поступила в редакцию 28.07.2016 г.