

УДК 678.4:539.3

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ РАСЧЕТА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭЛАСТОМЕРНЫХ БЛОКОВ ДЛЯ ВИБРОСЕЙСМОЗАЩИТЫ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

¹Булат А.Ф., ²Кобец А.С., ¹Дырда В.И., ¹Лисица Н.И., ³Козуб Ю.Г.,
⁴Гребенюк С.Н., ⁵Немченко В.В.

¹Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, ²Днепропетровский аграрно-экономический университет, ³Луганский национальный университет им. Тараса Шевченко, ⁴Запорожский национальный университет, ⁵ООО «Монодит»

ДЕЯКІ ПРОБЛЕМИ РОЗРАХУНКУ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЕЛАСТОМЕРНИХ БЛОКІВ ДЛЯ ВІБРОСЕЙСМОЗАХИСТУ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД

¹Булат А.Ф., ²Кобець А.С., ¹Дирда В.І., ¹Лисиця М.І., ³Козуб Ю.Г.,
⁴Гребенюк С.М., ⁵Немченко В.В.

¹Институт геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, ²Дніпровський аграрно-економічний університет, ³Луганський національний університет ім. Тараса Шевченка, ⁴Запорізький національний університет, ⁵ВАТ «Монодит»

SOME PROBLEMS OF CALCULATION AND EXPERIMENTAL STUDIES OF ELASTOMERIC BLOCKS FOR VIBROSEISMIC PROTECTION OF BUILDINGS AND STRUCTURES

¹Bulat A.F., ²Kobets A.S., ¹Dyrda V.I., ¹Lisitsa N.I., ³Kozub Yu.G., ⁴Grebenyuk S.N.,
⁵Nemchenko V.V.

¹Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Polyakov of National Academy of Science of Ukraine, ²Dnipro State Agrarian and Economic University, ³Luhansk Taras Shevchenko National University, ⁴Zaporizhzhya National University, ⁵“Monodit” LLC

Аннотация. Рассматриваются основные проблемы системы вибросейсмозащиты зданий и сооружений с помощью слоистых эластомерных блоков, которые характеризуются высокой вертикальной жёсткостью, низкой жёсткостью на сдвиг, высокой диссипацией энергии и способностью к центрированию вертикальной нагрузки; обладают высокой надёжностью и отсутствием риска внезапного отказа.

Рассматривается расчёт эластомерных блоков при статическом сжатии. Исследуются компоненты напряжённо-деформированного состояния тонкослойных элементов. Проведён расчёт величины сжатия тонкого резинового слоя под действием вертикально приложенной силы. В случае принятия упрощающих гипотез аналитическим методом получена зависимость величины осадки резинового слоя при различных соотношениях радиуса и толщины. Задачу решали при упругом деформировании для резинового слоя. При численном расчёте слабая сжимаемость резины моделировалась с помощью моментной силы конечного элемента для слабосжимаемых материалов, которая заключается в тройной аппроксимации полей перемещений, компонент деформаций и функции изменения объёма. Численное решение получено методом конечных элементов для различных соотношений радиуса и толщины в случае геометрически нелинейного упругого и вязкоупругого деформирования.

Геометрическая нелинейность описывалась с помощью тензора нелинейных деформаций. Для моделирования вязкоупругих свойств резины использовали наследственную теорию Больцмана-Вольтерра с ядром релаксации Ю.Н. Работнова. Нелинейные краевые задачи решались модифицированным методом Ньютона-Канторовича. Исследовано влияние геометрической нелинейности и вязкоупругих свойств резины на величину осадки резинового слоя.

Изложены результаты статических и динамических испытаний параметрического ряда эластомерных блоков для защиты жилых зданий от вибраций. Рассматривается конструкция свай с виброизолирующими резиновыми опорами.

Разработанные и испытанные конструкции были использованы для виброзащиты от поездов метрополитена и автотранспорта жилых домов в г. Киеве: 10-секционного 10-этажного жилого дома по ул. Киквидзе и трёх 27-этажных домов по Оболонскому проспекту, а также трёх домов в г. Львове.

Вибросейсмоизоляция с помощью эластомерных блоков обеспечивает собственную частоту колебаний здания в горизонтальной плоскости менее 1 Гц, что соответствует требованиям национальных стандартов, которые гармонизированы с соответствующими частями Еврокода 8 к проектированию систем сейсмоизоляции зданий.

Ключевые слова: вибросейсмозащита зданий и сооружений, виброизолятор, статические и динамические исследования, расчёт виброизоляторов.

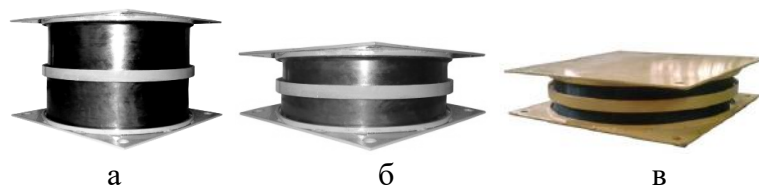
Анализ мировой практики вибросейсмозащиты зданий и сооружений показывает, что системы с использованием эластомерных блоков являются наиболее перспективными с точки зрения стоимости и эффективности. Указанные системы позволяют защитить здания и сооружения при сейсмических воздействиях не только в вертикальной и горизонтальной плоскостях, но и от кручения. Считается, что именно кручение в сочетании с неблагоприятными факторами, в частности с вертикальной составляющей толчков, являются основной причиной катастрофических разрушений при землетрясениях.

Система вибросейсмозащиты предназначена для снижения сейсмической реакции зданий и защиты их от землетрясений. Она может также применяться при защите строительных объектов от промышленных вибраций и ударных волн, таких, как волны от взрывов на карьерах, от вибраций и шума метрополитена, автомобильного, железнодорожного транспорта. Применение вибросейсмозащиты регламентировано европейскими и национальными нормативными документами: ДСТУ-Н Б EN 1998-1:2010 Еврокод 8 «Проектирование сейсмостойких конструкций. Часть 1. Общие правила, сейсмические действия, правила касательно сооружений» (EN 1998-1:2004, IDT), и ДБН. И.1.1-12:2014 «Строительство в сейсмических районах Украины».

Для практического применения систем вибросейсмозащиты зданий Институтом геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины и ГП НИИСК были выполнены экспериментальные исследования для обоснования параметров эластомерных блоков, запатентованы их конструкции, разработана конструкторская документация и изготовлены экспериментальные образцы четырёх типов диаметром 340 мм, 400 мм и 500 мм и общей высотой резинового слоя: 2×120 мм, 2×70 мм и 2×50 мм. Экспериментальные образцы эластомерных блоков изготовлены предприятием «Монодит» (рис. 1).

Для промышленного определения жесткостных и демпфирующих характеристик эластомерных блоков были проведены в ГП НИИСК лабораторные испытания четырёх типов разработанных конструкций при статических и динамических нагрузках в соответствии с требованиями Еврокода 8, европейского и международного стандартов.

Цель работы – расчёт и экспериментальные исследования



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

Рисунок 1 – Экспериментальные образцы эластомерных блоков

динамических и статических характеристик разработанных конструкций эластомерных блоков (ЭБ).

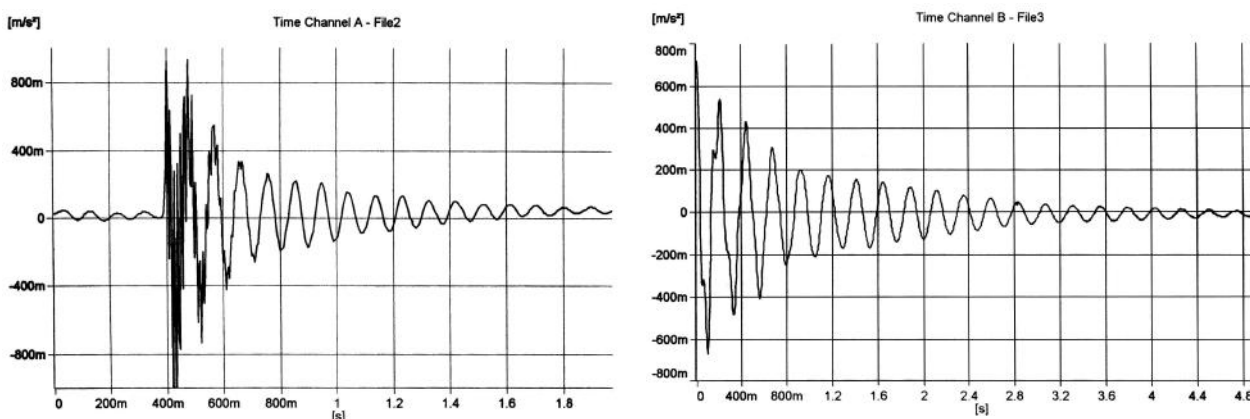
Результаты экспериментальных исследований. Испытания ЭБ проводились в два этапа: сначала динамические – определение демпфирующих характеристик опор, а затем статические – определение жесткостных характеристик опор на сжатие и сдвиг.

При динамических испытаниях на четыре одинаковые ЭБ устанавливался железобетонный блок массой 5100 кг (для опор 2×120 мм и диаметром 400 мм) – рис. 2,а, железобетонный блок массой 2850 кг (для опор 2×50 мм и диаметром 480 мм), железобетонный блок массой 3400 кг (для опор 2×50 мм и диаметром 500 мм) – рис. 2,б.

Колебания блоков в горизонтальной и вертикальной плоскостях задавались специальным устройством и регистрировались двухканальным спектроанализатором марки 2148 фирмы «Брюль и Кьер» (Дания). На основе инструментальных записей сигналов виброускорений при свободных колебаниях динамической системы «бетонный блок – ЭБ» (рис. 3) определены значения динамической вертикальной и горизонтальной жесткостей и параметры затухания испытываемых опор. Полученные данные приведены в табл. 1.



Рисунок 2 – Лабораторные динамические испытания эластомерных блоков



а – колебания в вертикальной плоскости;

б – колебания в горизонтальной плоскости

Рисунок 3 – Примеры записи колебаний железобетонного блока на четырёх ЭБ

Таблица 1 – Результаты динамических испытаний ЭБ

Динамические характеристики ЭБ	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 опор выполнялись на специальном стенде при деформации простого сдвига.

Нагружение осуществлялось гидравлическими домкратами по (50-300) кН в зависимости от типа опоры с выдержкой 5 мин на каждой ступени, после чего снимались показания вертикальных перемещений. Максимальная вертикальная нагрузка доводилась до 5000 кН. Испытания опор на сдвиг проводились на специальном стенде, оборудованном гидравлическими домкратами для создания вертикальных и сдвиговых нагрузок. Измерения сдвиговых перемещений верха сейсмоопоры выполнялись при вертикальных нагрузках 300; 500; 600; 1000 кН.

На рис. 4 приведён общий вид ЭБ диаметром 500 мм под нагрузкой 3000 кН. На рис. 5 представлены зависимости «вертикальная нагрузка – перемещение» для опор диаметром 400 мм, где кривая 1 соответствует ЭБ высотой 2×70 мм, кривая 2 – высотой 2×120 мм

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



Рисунок 4 – Общий вид ЭБ диаметром 500 мм под нагрузкой 3000 кН

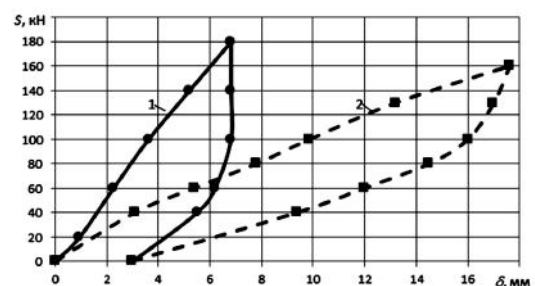


Рисунок 5 – Зависимости «вертикальная нагрузка – перемещение» для ЭБ диаметром 400 мм

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 12-ти испытанных резиновых элементов не обнаружены.

Расчёт эластомерных блоков. Решение этой задачи посвящены работы [1-5].

Для представленных выше сейсмоопор в ходе статических испытаний была определена жёсткость на сжатие при различной величине нагрузки. В результате несложных пересчётов можно определить зависимость между осадкой опоры и прикладываемой нагрузкой (весом строительной конструкции), используя формулу:

$$\Delta = P/C_{см.в},$$

где Δ – осадка сейсмоопоры, P – сжимающая нагрузка, $C_{см.в}$ – вертикальная жёсткость сейсмоопоры.

С другой стороны, в работе [4] для малых деформаций ($\varepsilon < 0,1$) методом Ритца получена аналитическая зависимость между осадкой цилиндрического резинового слоя со свободными торцами и прикладываемой нагрузкой:

$$\Delta = \frac{P_0 h}{3\pi R^2 G} \left[1 - \frac{R}{h\sqrt{6}} \operatorname{th} \frac{h\sqrt{6}}{R} \right], \quad (1)$$

где P_0 – сжимающая нагрузка для резинового слоя со свободными торцами, h – высота резинового слоя, R – радиус резинового слоя, G – модуль сдвига резины.

При одноосном сжатии для малых деформаций ($\varepsilon < 0,1$) зависимость между осадкой резинового слоя и прикладываемой нагрузкой определяется формулой:

$$\Delta = \frac{P_0 h}{3\pi R^2 G}. \quad (2)$$

При расчёте сейсмоопор необходимо учитывать, что торцы резинового слоя привулканизированы к металлическим пластинам, тогда в формулы (2) и (3) вместо нагрузки P_0 необходимо подставить скорректированное значение реальной нагрузки P , которое учитывает увеличение жёсткости за счёт закрепления торцов:

$$P_0 = P/\beta, \quad (3)$$

где $\beta = 1 + 0,413\rho^2$ – по Пейну; $\beta = 0,92 + 0,5\rho^2$ – по Лавенделу.

В работе [4] предложено вычислять β по формуле:

$$\beta = 1 + 0,83\rho^2, \quad (4)$$

где $\rho = R/h$, β – коэффициент увеличения жёсткости за счёт закрепления торцов.

Универсальным численным методом расчёта резиновых виброисоляторов, который позволяет учитывать несимметричность нагрузок и закреплений, а также получать полную картину напряжённо-деформированного состояния является метод конечных элементов (МКЭ). При этом традиционный МКЭ не позволяет учесть такое свойство резины как слабая сжимаемость материала, поэтому воспользуемся специально разработанной схемой МКЭ – моментной схемой конечного элемента (МСКЭ) для слабосжимаемых материалов. Данная схема заключается в тройной аппроксимации компонент вектора перемещений, компонент тензора деформаций и функции изменения объёма, и удержании ряда слагаемых согласно определённым правилам. Для призматического конечного элемента треугольной формы эти аппроксимации принимают вид [3]:

$$\begin{aligned}
 u_{k'} &= \sum_{pqr}^{lmn} \omega_{k'}^{(pqr)} \psi^{(pqr)} = \omega_{k'}^{(000)} + \omega_{k'}^{(100)} \psi^{(100)} + \omega_{k'}^{(010)} \psi^{(010)} + \\
 &+ \omega_{k'}^{(110)} \psi^{(110)} + \omega_{k'}^{(001)} \psi^{(001)} + \omega_{k'}^{(101)} \psi^{(101)}, \\
 \varepsilon_{11} &= e_{11}^{(000)} + e_{11}^{(010)} \psi^{(010)} + e_{11}^{(001)} \psi^{(001)}, \\
 \varepsilon_{22} &= e_{22}^{(000)} + e_{22}^{(100)} \psi^{(100)}, \quad \varepsilon_{33} = e_{33}^{(000)} + e_{33}^{(100)} \psi^{(100)}, \\
 \varepsilon_{12} &= e_{12}^{(000)}, \quad \varepsilon_{13} = e_{13}^{(000)}, \quad \varepsilon_{23} = e_{23}^{(000)} + e_{23}^{(100)} \psi^{(100)}, \\
 \theta &= e_{11}^{(000)} g^{11} + e_{22}^{(000)} g^{22} + e_{33}^{(000)} g^{33},
 \end{aligned}$$

где $u_{k'}$ – компоненты вектора перемещений по направлению оси k' базисной системы координат; ε_{ij} – компоненты тензора деформаций; θ – функция изменения объёма; l, m, n – максимальные степени аппроксимирующих полиномов относительно осей местной системы координат x_1, x_2, x_3 ; g^{ij} – компоненты метрического тензора; $\omega_{k'}^{(pqr)}$ – коэффициенты разложения перемещений; $e_{ij}^{(pqr)}$ – коэффициенты разложения деформаций; $\psi^{(pqr)}$ – набор степенных координатных функций вида:

$$\psi^{(pqr)} = \frac{(x_1)^p (x_2)^q (x_3)^r}{p! q! r!}.$$

Для повышения точности расчётов используют уточнённые схемы МСКЭ [2].

Найдём осадку Δ для двухслойной сейсмоопоры диаметром $d = 400$ мм, высотой резинового слоя $h = 240$ мм и модулем упругости $G = 0,63$ МПа от действия нагрузки $P = 50$ кН.

В работе [4] решение нелинейной задачи осадки сплошного цилиндра с учётом особенностей ужесточения на торцах было найдено численно методом Рунге-Кутты четвёртого порядка точности. Для этого необходимо было решить задачу Коши при определённых граничных условиях. В результате расчётов было получено значение осадки сейсмоизолятора $\Delta = 0,0127$ м, что хорошо совпадает с экспериментальными исследованиями.

Поставленная задача также была численно реализована на основе моментной схемы конечных элементов в рамках вычислительного комплекса «МИРЕЛА+». На рис. 2 приведено распределение компонент тензора напряжений в сейсмоопоре.

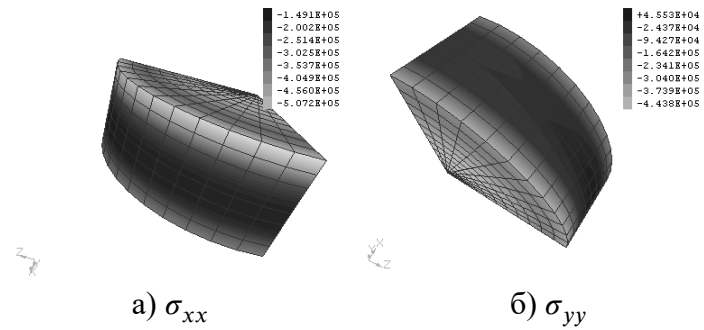


Рисунок 2 – Распределения нормальных напряжений по сейсмоопоре

Проведём расчёт осадки, используя формулы (1) и (2), с коэффициентом ужесточения β , определяемым по формуле (4). В рассматриваемом случае

$$\beta = 1 + 0,83(R/h)^2 = 1 + 0,83 \cdot (200 \cdot 10^{-3} / 120 \cdot 10^{-3})^2 \approx 2,38.$$

Подставим полученное значение в формулу (3):

$$P_0 = P/\beta = 50 \cdot 10^3 / 2,38 \approx 21 \text{ кН.}$$

Найдём осадку одного слоя сейсмоопоры по формуле (1):

$$\Delta = \frac{21 \cdot 10^3 \cdot 0,12}{3 \cdot 3,14 \cdot (0,2)^2 \cdot 6,3 \cdot 10^5} \cdot \left[1 - \frac{0,2}{0,12\sqrt{6}} \operatorname{th} \frac{0,12\sqrt{6}}{0,2} \right] \approx 0,0042 \text{ м}$$

Далее рассчитаем осадку одного слоя сейсмоопоры по формуле (2):

$$\Delta = \frac{P_0 h}{3\pi R^2 G} \approx \frac{0,0126 \cdot (120 \cdot 10^{-3})}{3 \cdot 3,14 \cdot (200 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 6,3} \approx 0,0064.$$

Все полученные результаты расчёта осадки рассматриваемого виброизолятора приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты расчёта осадки сейсмоопоры

Показатель	Способ расчёта осадки			
	экспериментальные исследования	формулы		численная реализация
		(1)	(2)	
Осадка (максимальный прогиб резинового элемента) (м):	0,0127	0,0084	0,0128	0,01128

1. Разработанные и испытанные конструкции РСБ могут быть использованы для сейсмозащиты жилых домов и обеспечить собственную частоту колебаний здания в горизонтальной плоскости 1 Гц и менее. Следует отметить, что разработанные конструкции РСБ могут быть также использованы для защиты зданий и сооружений от воздействий железнодорожного транспорта, метрополитена, а также для виброизоляции тяжёлых машин различного технологического назначения.

2. Наиболее точный результат получается при использовании формулы (2), однако данная формула не даёт целостной картины распределения напряжённо-деформированного состояния сейсмоопоры в отличие от численного подхода и метода Ритца.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бидерман, В.Л. Расчет цилиндрических и прямоугольных длинных резиновых амортизаторов сжатия / В.Л. Бидерман, Н.А. Сухова // Расчеты на прочность. – 1968. – № 13. – С. 55-72.
2. Гребенюк, С.Н. Повышение точности моментной схемы конечного элемента для слабосжимаемых материалов / С.Н. Гребенюк, А.А. Бова // Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании. – 2009. – Т. 22. – С. 55-64.
3. Дырда, В.И. Аналитические и численные методы расчета резиновых изделий / В.И. Дырда, С.Н. Гребенюк, С.И. Гоменюк. – Днепрпетровск-Запорожье: Запорожский национальный университет, 2012. – 370 с.
4. Дырда, В.И. Решение задачи о сжатии вязкоупругого цилиндра методом Ритца / В.И. Дырда, А.В. Гончаренко, Л.В. Жарко // Геотехническая механика. – 2010. – Вып. 86. – С. 113-124.
5. Киричевский, В.В. Метод конечных элементов в механике эластомеров: [монография] / В.В. Киричевский. – К.: Наукова думка, 2002. – 655 с.

REFERENCES

1. Biderman, V.L. (1968), "Calculation of cylindrical and rectangular long rubber shock absorbers", *Raschety na prochnost* [Strength calculations], no. 13, pp. 55-72.
2. Grebeniuk, S.N. and Bova, A.A. (2009), "Increase of accuracy of the moment diagram of a finite element for weakly compressible materials", *Sovremennyye problemy i puti ikh resheniya v nauke, transporte, proizvodstve i obrazovanii* [Modern problems and ways of their solution in science, transport, production and education], vol. 22, pp. 55-64.
3. Dyrda, V.I., Grebenyuk, S.N. and Gomenyuk, S.I. (2012), *Analitycheskiye i chislennyye metody rascheta rezinovykh izdeliy* [Analytical and numerical methods for calculating rubber products], Zaporozhye National University, Dnepropetrovsk-Zaporozhye, Ukraine.
4. Dyrda, V.I., Goncharenko, A.V. and Zharko, L.V. (2010), "Solution of the problem of compression of a viscoelastic cylinder by the Ritz method", *Geo-Technical Mechanics*, no. 86, Dnipro, Ukraine.
5. Kirichevskiy, V.V. (2002), *Metod konechnykh elementov v mekhanike elastomerov* [The finite element method in the mechanics of elastomers], Naukova dumka, Kyiv, Ukraine.

Об авторах

Булат Анатолий Фёдорович, Академик Национальной академии наук Украины, доктор технических наук, профессор, директор института, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепр, Украина, office.igtm@nas.gov.ua

Кобец Анатолий Степанович, доктор наук по государственному управлению, профессор, ректор, Днепровский государственный аграрно-экономический университет (ДГАЭУ), Днепр, Украина, info@dsau.ua

Дырда Виталий Илларионович, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом механики эластомерных конструкций горных машин, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепр, Украина, vita.igtm@gmail.com

Лисица Николай Иванович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник отдела механики эластомерных конструкций горных машин, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепр, Украина, vita.igtm@gmail.com

Козуб Юрий Гордеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологий производства и профессионального образования, Луганский национальный университет им. Тараса Шевченко (ЛНУ им. Тараса Шевченко), Луганск, Украина, kosub@rambler.ru

Гребенюк Сергей Николаевич, доктор технических наук, заведующий кафедрой математического анализа Запорожского национального университета (ЗНУ), Запорожье, Украина

Немченко Виталий Владимирович, инженер, директор ООО «Монодит», Днепр, Украина, monodit@list.ru

About the authors

Bulat Anatoly Fedorovich, Academician of the National Academy of Science of Ukraine, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Professor, Director of the Institute, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Polyakov of National Academy of Science of Ukraine (IGTM NASU), Dnipro, Ukraine, office.igtm@nas.gov.ua.

Kobets Anatoliy Stepanovych, Doctor of Public Administration, Professor, Rector, Dnipro State University of Agriculture and Economics, Dnipro, Ukraine, info@dsau.ua.

Dyrda Vitaliy Illarionovich, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Professor, Head of Department of Elastomeric Component Mechanics in Mining Machines, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Polyakov of National Academy of Science of Ukraine (IGTM NASU), Dnipro, Ukraine, vita.igtm@gmail.com.

Lisitsa Nikolay Ivanovich, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Researcher, Senior Researcher in Department of Elastomeric Component Mechanics in Mining Machines, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Polyakov of National Academy of Science of Ukraine (IGTM NASU), Dnipro, Ukraine, vita.igtm@gmail.com.

Kozub Yuriy Gordeyevich, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor, Associate Professor in Department of Technology of Production and Trade Education, Luhansk Taras Shevchenko National University (LTSNU), Lugansk, Ukraine, kosub@rambler.ru.

Grebenyuk Sergey Nikolayevich, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Head of the Department of Mathematical Analysis in Zaporizhzhya National University (ZNU), Zaporizhzhya, Ukraine, gsm1212@ukr.net.

Nemchenko Vitaliy Vladimirovich, Master of Science, Director of "Monodit" LLC, Dnipro, Ukraine, monodit@list.ru.

Анотація. Розглядаються основні проблеми системи віброейсмозахисту будівель і споруд за допомогою шаруватих еластомерних блоків, які характеризуються високою вертикальною жорсткістю, низькою жорсткістю на зсув, високою дисипацією енергії і здатністю до центрування вертикального навантаження; мають високу надійність і відсутність ризику раптової відмови.

Розглядається розрахунок еластомерних блоків при статичному стисненні. Досліджуються компоненти напружено-деформованого стану тонкошарових елементів. Проведено розрахунок величини стиснення тонкого гумового шару під дією вертикально прикладеної сили. У разі прийняття спрощуючих гіпотез аналітичним методом отримана залежність величини осадку гумового шару при різних співвідношеннях радіусу і товщини. Завдання вирішували при пружному деформуванні для гумового шару. При чисельному розрахунку слабка стисливість гуми моделювалася за допомогою моментної сили кінцевого елемента для слабостискаємих матеріалів, яка полягає в потрійній апроксимації полів переміщень, компонент деформацій та функції зміни об'єму. Чисельне рішення отримано методом кінцевих елементів для різних співвідношень радіусу і товщини в разі геометрично нелінійного пружного і в'язкопружного деформування.

Геометрична нелінійність описувалася за допомогою тензора нелінійних деформацій. Для моделювання в'язкопружних властивостей гуми використовували спадкову теорію Больцмана-Вольтерра з ядром релаксації Ю.Н. Работнова. Нелінійні крайові задачі вирішувалися модифікованим методом Ньютона-Канторовича. Досліджено вплив геометричної нелінійності і в'язкопружних властивостей гуми на величину осадку гумового шару.

Викладено результати статичних і динамічних випробувань параметричного ряду еластомерних блоків для захисту житлових будинків від вібрацій. Розглядається конструкція палі з віброізолюючими гумовими опорами.

Розроблені і випробувані конструкції були використані для віброзахисту від поїздів метрополітену та автотранспорту житлових будинків в м. Києві: 10-секційного 10-поверхового житлового будинку по вул. Кіквідзе і трьох 27 поверхових будинків по Оболонському проспекту, а також трьох будинків у м. Львові.

Віброейсмоізоляція за допомогою еластомерних блоків забезпечує власну частоту коливань будівлі в горизонтальній площині менше 1 Гц, що відповідає вимогам національних стандартів, які гармонізовані з відповідними частинами єврокодів 8 до проектування систем сейсмоізоляції будівель.

Ключові слова: віброейсмозахист будівель і споруд, віброізолятор, статичні та динамічні дослідження, розрахунок віброізоляторів.

Abstract. In the work, the key problems of the system of vibroseismic protection of buildings and structures with the help of layered elastomeric blocks that are characterized by high vertical stiffness, low shear rigidity, high energy dissipation, ability to center the vertical load, high reliability and no risk of sudden failure are considered.

Calculation of elastomeric blocks under static compression is considered. Components of the stress-strain state of thin-layer elements are studied. Calculation of thin rubber layer compression under the action of vertically applied force was carried out. For the case of assumed simplifying hypotheses, dependence between the rate of rubber layer settling and different ratios of radius and thickness was obtained by analytical method. The problem was solved by elastic deformation of the rubber layer. In numerical calculation, weak compressibility of rubber was simulated by moment force of the finite element for weakly compressible materials, which assumed triple approximation of displacement fields, deformation components and volume change functions. The numerical solution was obtained by finite element method for different ratios of radius and thickness in case of geometrically nonlinear elastic and viscoelastic deformation.

Geometric nonlinearity was described with the help of nonlinear deformation tensor. In order to simulate viscoelastic properties of rubber, the Boltzmann-Volterra hereditary theory with the Yu.N. Rabotnov's relaxation kernel was used. Nonlinear boundary-value problems were solved by the modified Newton-Kantorovich method. Influence of geometric nonlinearity and viscoelastic properties of rubber on the rate of the rubber layer settling was studied.

Results of static and dynamic tests of parametric series of elastomeric blocks for protecting residential buildings against vibrations are presented. Design of a pile with vibration-proof rubber supports is considered.

The designed and tested structures were used for protecting apartment houses in Kiev (10 sectional 10-storey apartment house in the Kikvidze street and three 27-storey houses in Obolonsky avenue) and three houses in Lviv against vibration caused by motor vehicles and underground trains.

Vibroseismic insulation with the help of elastomeric blocks ensures less than 1 Hz of natural oscillation frequency of the building in the horizontal plane, hence, meeting requirements of national standards that are harmonized with corresponding parts of Eurocode 8 for designing of seismic insulation systems for buildings.

Keywords: vibroseismic protection of buildings and structures, vibration isolator, static and dynamic studies, calculation of vibration isolators.

Статья поступила в редакцию 01.02.2018

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук В.Г. Шевченко