УДК 691.841

Дырда В.И., Твердохлеб Т.Е., Лисица Н.И., Лисица Н.Н.

ПРИМЕНЕНИЕ β-МЕТОДА ДЛЯ РАСЧЕТА РЕЗИНОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВИБРОСЕЙСМОБЛОКОВ

Наведено алгоритм для розрахунку гумометалевих вібросейсмоблоків для захисту важких машин та споруд від дії сейсмічних та динамічних навантажень.

APPLICATION β-METHOD FOR CALCULATION RUBBER-METALLICAL ВИБРО SEISMOBLOCKS

The algorithm for calculations rubber-metal vibroseismoblocks for guard of high-gravity ambulances and buildings from operation seismic and dynamic loads is reduced.

1 Постановка проблемы

Обеспечение безопасности проживания в сейсмических районах Украины представляет серьезную проблему для страны. Здесь, в зоне сейсмического риска (землетрясения интенсивностью более 6 баллов), находится более 100 населенных пунктов с территорией свыше 50 тыс. кв. км и населением около 10 млн. человек. К ним относятся: весь Крымский полуостров, юг Одесской и Херсонской областей, районы Закарпатья (район Вранча) и т.д. поэтому при строительстве зданий и сооружений в районах, подверженных воздействию землетрясений интенсивностью более 6 баллов, должна быть обеспечена их сейсмостойкость, то есть способность противостоять воздействию землетрясений [1, 14].

Методы сейсмозащиты зданий и сооружений. Традиционные системы сейсмозащиты обеспечивают сейсмостойкость объектов путем повышения несущей способности конструкций и их соединений, стимулируя создание более прочных, жестких и монолитных сооружений. При этом стоимость строительства в сейсмических районах по сравнению с несейсмическими увеличивается на 4-12 % в зависимости от бальности [4, 5]. В то же время анализ последствий землетрясений показывает [6-8]: прогноз сейсмической опасности, применяемые меры обеспечения сейсмостойкости зданий и сооружений пока недостаточно надежны, поскольку не всегда гарантируют требуемую сейсмостойкость.

Нетрадиционные системы сейсмозащиты [5, 8] можно разделить на следующие группы:

- сейсмоизоляция, при которой осуществляется полное или частичное снижение кинематической связи между фундаментом и надземными конструкциями сооружений;
- с односторонними включающимися или выключающимися связями, позволяющими изменять жесткость и собственную частоту надземных конструкций в процессе сейсмических колебаний сооружения;
- с повышенным демпфированием, в которых основной эффект рассеивания энергии колебаний достигается путем применения специальных устройств и узлов внешнего или внутреннего трения (сухого, вязкого, гистерезисного и др.);
- с динамическими гасителями колебаний, обеспечивающими передачу части энергии колебания здания дополнительной массе на упругих связях;
- с регулированием внутренних усилий и перемещений, обеспечивающими изменение в требуемом направлении напряженно-деформированного состояния конструкций и внутренней динамической структуры сооружения в целом.

Считается [5, 9, 10], что применение систем вибросейсмозащиты позволяет:

- обеспечить сохранность зданий и сооружений при землетрясениях и техногенных воздействиях;
- снизить сметную стоимость строительства на 3-6 %;
- уменьшить материалоемкость зданий и сооружений на 5-10 %;

- снизить трудоемкость строительства на 4-6 %;
- расширить область применения типовых конструкций путем застройки районов с повышенной сейсмичностью, увеличения высоты здания при использовании тех же конструкций.

Системы с упругими виброизоляторами и подвесками. Системы с упругими виброизоляторами и подвесками для сейсмоизоляции зданий разработаны в большинстве случаев по аналогии с устройствами по виброизоляции машин и механизмов [11]. Известна широкая номенклатура виброизоляторов в виде цилиндрических и тарельчатых пружин, резиновых и резинометаллических параллелепипедов, цилиндров, ковриков и т.п. В практике сейсмозащиты зданий указанные элементы используются в сочетании с другими средствами сейсмозащиты. Благодаря этому обеспечивается отстройка изолируемого объекта от преобладающих колебаний грунта или поддерживающих конструкций.

Наиболее перспективными конструкциями считаются резиновые и резинометаллические виброизоляторы. По сравнению с металлическими пружинами (цилиндрические витые, тарельчатые) виброизоляторы из резины имеют ряд преимуществ – относительная простота изготовления; высокая несущая способность; наличие гистерезисных потерь, что существенно упрощает конструкции дополнительных демпфирующих устройств; отсутствие мгновенного отказа.

Анализ конструктивных особенностей сейсмоизоляции зданий показывает, что наиболее перспективным считается применение сейсмоизоляторов на основе резинометаллических конструкций. Это позволяет защитить здания при сейсмических воздействиях не только в горизонтальной и вертикальной плоскостях, но и от кручения. Считается [12], что именно кручение в сочетании с неблагоприятными факторами, в частности с вертикальной составляющей толчков, является основной причиной катастрофических разрушений при землетрясениях. Кроме того, применение резинометаллических слоистых виброизоляторов позволяет защитить здания и находящихся в них людей от воздействий метрополитена, автомобильного и железнодорожного транспорта [13-15].

В Украине (в основном в ИГТМ НАН Украины) концепция вибросейсмозащиты развивалась двумя путями: разработка сейсмоизоляционных блоков для защиты от землетрясений жилых зданий; разработка виброизоляционных блоков для защиты от вибраций тяжелого оборудования (вес до 300 т, использовано в России, Украине).

Анализ последних исследований и публикаций, в которых начато решение данной проблемы. Система полной сейсмоизоляции сооружений [4] состоит из резинометаллических сейсмоизоляционных блоков (РСБ) и механических предохранителей: упруго-пластичные демпферы, скользящие опоры, нелинейные торсионные элементы и т.д. Она предназначена для защиты от землетрясений чувствительных к колебаниям сооружений, которые имеют большое значение для безопасности людей: больницы, школы, музеи, транспортные средства, электростанции, административные и военные объекты и т.д. РСБ для крупных сооружений изготавливаются путем набора листов специальной резины толщиной 3-20 мм и стальных пластин толщиной 2-5 мм, соединенных с помощью вулканизации. РСБ работают на сжатие, растяжение, сдвиг и кручение; они могут выдерживать кратковременные циклические отклонения в горизонтальном и вертикальном направлениях. РСБ действуют как фильтр: при малой интенсивности землетрясений (0,15-0,20g) сооружение благодаря РСБ колеблется упруго и возвращается в свое первоначальное положение; при землетрясениях большой интенсивности (свыше 0,25g) сооружение колеблется упруго, а затем вступают в действие механические предохранители. РСБ имеют заданные технические характеристики и низкую собственную частоту колебаний; они снижают также высокочастотный спектр колебаний. РСБ выдерживают многократные сейсмические нагрузки без ремонта, легко заменяются; они эксплуатируются при резком перепаде температур, радиации, активном влиянии внешней среды; РСБ обладают высокой надежностью и не имеют внезапного отказа. Технические характеристики и высокая надежность РСБ доказаны результатами промышленных исследо-

ваний в течение 10 лет системы виброизоляции инерционных дробилок типа КИД весом 155 т, работающих при постоянных циклических нагрузках (амплитуда горизонтальных колебаний 5-8 мм, частота 16 Гц) в условиях свинцово-цинкового комбината (г. Джезказган, Средняя Азия [16]). На РСБ со свинцовым вкладышем и нелинейной силовой характеристикой институт имеет патент Украины № 93300932 от 29.10.1993 г. Для виброизоляции сооружений могут быть использованы также резиновые блоки; так, например, при виброизоляции административного здания (г. Минск, Белоруссия, вес здания 30000 т, количество опор – 300, несущая способность каждой опоры – 100 т) от вибраций проходящего рядом метрополитена были использованы монолитные резиновые блоки высотой 120 мм, аналогичные блоки были использованы при сейсмоизоляции жилых 9-ти этажных домов.

В последние годы в г. Москве резиновые и резинометаллические блоки успешно используют для виброзащиты зданий, возводимых вблизи трасс метрополитена. Практика показывает высокую эффективность применения таких блоков [17].

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которым посвящается статья. Анализ конструктивных особенностей сейсмоизоляции зданий и сооружений показывает, что наиболее перспективным считается применение сейсмоизоляторов на основе резинометаллических конструкций. Но отсутствие аналитических расчетов параметров сейсмоизоляторов и сложность конструкции изолирующих опор, высокая трудоемкость изготовления сдерживают широкое применение РСБ для защиты зданий, сооружений и машин от действия сейсмических и динамических нагрузок.

Целью настоящей статьи является разработка алгоритма расчета цилиндрических сплошных резинометаллических вибросейсмоблоков (расчет жесткостных и диссипативных параметров) при деформациях осевого сжатия, при произвольном комбинированном нагружении сдвиг–сжатие при длительном циклическом нагружении с учетом эффектов физической нелинейности и в зависимости от конструкционных особенностей элементов. Интервал исследуемых частот 0-100 Гц, диапазон изменения амплитуд деформаций: 0÷10 % при сжатии; 0÷20 % при сдвиге.

В основе расчетов лежит введение универсального конструктивно-деформационного параметра β, который позволяет установить параметры жесткости, температуры диссипативного разогрева и долговечности для элементов разной конфигурации, выполненных из наполненных резин, с учетом эффектов физической нелинейности.

В качестве основных концепций при получении приближенных соотношений приняты основные положения нелинейной теории вязкоупругости, разработанные В.Г. Карнауховым и И.К. Сенченковым [18], а также энергетический подход к анализу процессов разрушения элементов разработанный В.И. Дырдой [19, 20]. Использованы также основополагающие работы В.Н. Потураева, В.Л. Бидермана, Э.Э. Лавендела, С.И. Дымникова, И.И. Круша, А. Пейна [21-27].

Статья рассматривается как продолжение опубликованных ранее работ [1, 2].

2 Изложение основного материала исследований

2.1 Экспериментальные исследования

Экспериментальным исследованиям подлежали резиновые и резинометаллические сплошные цилиндрические вибросейсмоизоляторы, в которых плоские слои резины чередуются с плоскими слоями металла и резина привулканизована к металлу по всей поверхности соприкосновения [2, 28].

Такие элементы обладают специфическими анизотропными свойствами: жесткости на сдвиг и на сжатие могут различаться на несколько порядков. Их использование очень выгодно для виброизоляции некоторых тяжелых машин, а также для защиты зданий и сооружений, находящихся в сейсмоопасных районах.

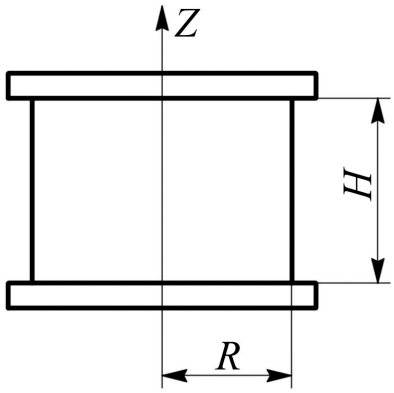
В результате расчета слоистого резинометаллического виброизолятора (рис. 1) [2] должны быть найдены его геометрические размеры [2]: диаметр резинового слоя $D = 2R$, толщина резинового слоя $h_р$, толщина слоя металла $h_м$, количество слоев резины

n. При этом имеется в виду, что диаметр металлического слоя практически равен или превосходит *D*, а количество слоев металла *n*+1. Крайние, нижний и верхний слои металла обычно выполняются утолщенными и имеют форму, удобную для крепления виброизолятора. При расчете последнее обстоятельство не будет учитываться.

Цели экспериментов:

- определение динамической жесткости вибросейсмоопор на сжатие и на сдвиг и определение статической жесткости на сжатие при разных нагрузках, а так же на сдвиг при фиксированном нагружении опоры;
- исследование эффектов на торцах;
- установление величин соотношения R/h_p, при которых возникают эффекты объемного сжатия резины в слое.

Основные виды нагружения: сдвиг, сжатие, комбинированный сдвиг со сжатием при длительном циклическом нагружении. Диапазоны гармонического нагружения: частоты (0÷100) Гц; амплитуды (0÷20) мм. Предварительное статическое нагружение от 3 до 15 % [18, 19]. Используются наполненные резины на основе синтетических каучуков, содержащие от 5 до 50-60 массовых частей технического углерода. Такие резины демонстрируют при гармоническом нагружении эффекты физической нелинейности в области малых деформаций, проявляющиеся в зависимости динамических характеристик материала от амплитуд напряжений и деформаций [20].



а) расчетная схема сплошного резинометаллического цилиндра

б) резинометаллический трехэлементный виброизолятор

а) опора 2×120 мм

б) опора 2×70 мм

Рис. 1 – Конструкции сейсмоопор

Исследования эффектов на торцах проводилось на сплошных резиновых и резинометаллических деталях цилиндрической формы, диаметром 100 мм и высотой 100 мм, изготовленных из серийной средненаполненной резины марка 2959 (на НК, 45 масс.ч технического углерода). Детали подвергались монофазному сжатию на механическом стенде со скоростью нагружения 0,002 м/с; часть экспериментов проводилась на установке типа «Instron» модели 1126. При исследованиях фиксировались механические

характеристики резины (в основном условно-равновесное усилие P_∞ и деформация ε) и геометрическая форма свободной поверхности образцов. Исследованию подлежали резиновые и резинометаллические цилиндрические элементы при следующих вариантах присоединения резины и металлической арматуры (рис. 2):

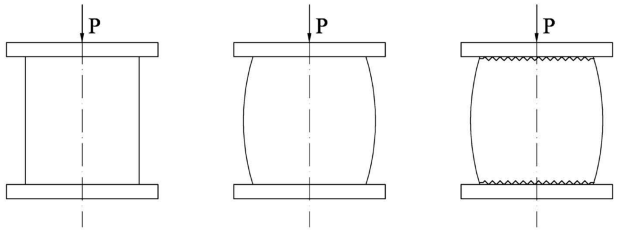


Рис. 2 – Форма свободной поверхности сплошного цилиндра при различных вариантах квазистатического сжатия силой *P*

- вариант а (рис. 2, а); металлическая арматура (высокий класс чистоты поверхности, хонингование с ручной доводкой) была смазана силиконовой смазкой или разделительной смазкой фирмы Münch; в этом случае при сжатии образца его боковая поверхность оставалась цилиндрической;
- вариант б (рис. 2, б); металлическая арматура присоединялась к резиновому массиву в процессе вулканизации (или приклеивалась клеем «Хемосил»); в этом случае при сжатии образца его боковая поверхность принимала бочкообразную форму;
- вариант в (рис. 2, в); между металлической арматурой и резиновым элементом размещалась наждачная бумага; в этом случае при сжатии образца его боковая поверхность также принимала бочкообразную форму.

Эти экспериментальные результаты используются для расчета коэффициента β и в дальнейшем, для выбора конструкции резинового элемента, геометрии его свободной поверхности и способа присоединения резины к металлической арматуре, т.е. жесткого крепления с помощью вулканизации или свободного закрепления в металлической чашке.

В ИГТМ НАН Украины и НИИСК разработан параметрический ряд РСБ для защиты жилых зданий и сооружений при сейсмических и динамических воздействиях [15, 29]. Характеристики РСБ приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Характеристики ряда РСБ

Диаметр элемента по резине, мм	Высота одного элемента, мм	Динамическая жесткость на сжатие одного элемента, МН/м	Количество элементов в опоре, шт.	Жесткость опоры на сжатие, МН/м	Толщина резины в опоре, мм	Жесткость опоры на сдвиг, МН/м
400	20	1560	8	195,0	160	1,33
			10	156,0	200	1,07
	30	484	6	80,6	180	1,2
	35	310	4	77,5	140	1,5
	40	210	4	52,5	160	1,33
			5	42,0	200	1,07
	45	150	4	37,5	180	1,2
	50	112	3	37,5	150	1,4
			4	28,0	200	1,07
	70	39	2	18,0	140	1,5
	120	17	2	8,5	240	0,9
430	20	2100	8	262,5	160	1,52
			10	210,0	200	1,22
	30	645	6	107,5	180	1,35
			7	92,1	210	1,16
	35	410	5	82,0	175	1,4
	40	278	4	69,5	160	1,52
			5	55,6	200	1,22
	45	200	4	50,0	180	1,35
	50	138	3	46,0	150	1,6
			4	34,5	200	1,22

На рис 1. приведены натурные образцы РСБ диаметром 400 мм и высотой 2×120 мм и 2×70 мм. РСБ состоит из двух резиновых элементов, которые с зазором установлены в металлических стаканах. Конструкция стаканов предусматривает невозможность повреждения боковой поверхности резиновых элементов при вертикальных и горизонтальных нагрузках. Крепления РСБ к конструкции зданий осуществляется с помощью анкеров, для которых в верхней и нижней пластинах выполнены отверстия. Если в процессе эксплуатации резиновый элемент требует замены, то домкратами около опоры осуществляется подъем стены на величину осадки плюс 20 мм. Таким образом резиновый элемент освобождается от нагрузки, что дает возможность вытащить один за другим каждый виброизолятор и произвести их замену.

Результаты динамических испытаний этих элементов приведены в табл. 2. [1]

Анализ табл. 2 показывает, что отношение жесткости на сдвиг к жесткости на сжатие составляет 1:6 для опоры 2×120 мм и 1:7 для опоры 2×70 мм.

Для исследования эффектов объемного сжатия исследовались резинометаллические элементы цилиндрической формы с различной толщиной резинового слоя h_p (см. табл. 3).

Таблица 2 – Результаты динамических испытаний

Показатели	Опора	
	2×120 мм	2×70 мм
Динамическая жесткость на сжатие, МН/м	5,59	13,6
Динамическая жесткость на сдвиг, МН/м	0,91	1,9
Частота собственных колебаний в вертикальной плоскости, Гц	10,44	14,13
Частота собственных колебаний в горизонтальной плоскости, Гц	4,25	5,38
Логарифмический декремент затухания колебаний	0,28÷0,4	0,18÷0,34

Таблица 3 – Результаты испытаний

№	h_p, мм	n	Δ, мм	p, кг	R/h_p	C, кг/см	$h_м$, мм
1	40	1	2	2,100	2,5	1050	5
2	20	2	2	5000	5	2500	5
3	10	4	2	10000	10	5000	5
4	5	8	2	10800	20	5400	5

Металлическая арматура была присоединена к резиновому массиву в процессе вулканизации. В табл. 3 приняты следующие обозначения: $h_м$ – толщина металла (для всех элементов $h_м$ = 5 мм); n – количество испытываемых элементов в стопке; p – сила при сжатии элементов; Δ – деформация стопки элементов; C – статическая жесткость стопки элементов при сжатии и выдержке под нагрузкой не менее 30 мин. Элементы изготавливались из средненаполненной резины типа 2959.

Исследования проводились на универсальном стенде FP100/1 с автоматической записью кривой «нагрузка-деформация». Предварительно все элементы подвергались тренировке: трехкратному деформированию с последующей разгрузкой, скорость нагружения 0,2 мм/сек.

Результаты испытаний приведены в табл. 3 и на рис. 2 и рис. 3.

Как видно (см. рис. 2), зависимость $P(\Delta)$ при деформации сжатия до $\varepsilon \leq 0{,}1$ практически линейна.

Соотношение $R/h_p \sim C$ (рис. 3) показывает, что в тонкослойных элементах при $R/h_p > 10$ возникает всестороннее сжатие.

Выводы. Анализ результатов измерений показывает [1]:

1) с увеличением вертикальной нагрузки для разработанных опор (рис. 1 в, г) соотношение вертикальной жесткости к горизонтальной для опор 2×120 мм уменьшается, а для опор 2×70 мм увеличивается по сравнению с динамическими испытаниями;

2) жесткость опор на сдвиг при статических испытаниях оказалась больше, чем при динамических, что обусловлено влиянием эффекта на торцах (малый зазор между резиновыми элементами и буртиками металлических пластин) – вертикальные нагрузки

на опоры при динамических испытаниях были в 15-17 раз меньше, чем при статических; для дальнейшего повышения допустимой нагрузки на опору необходимо увеличить до трех количество резиновых слоев при сохранении общей толщины резинового массива, чем обеспечится сдвиговая жесткость в пределах (1,0÷1,5) МН/м и частота собственных колебаний опор под номинальной нагрузкой в горизонтальной плоскости в пределах (0,8÷1,0) Гц.

3) экспериментально установлено, что в тонкослойных резинометаллических элементах при $R/h_p > 10$ возникает эффект объемного сжатия; при учете этого эффекта в случае определения жесткостных параметров для тонкослойных элементов следует модуль Юнга E заменять на модуль объемного сжатия K.

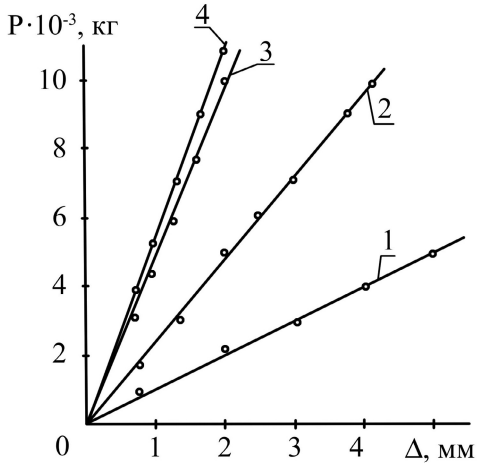


Рис. 2 – Зависимость $P \sim \Delta$

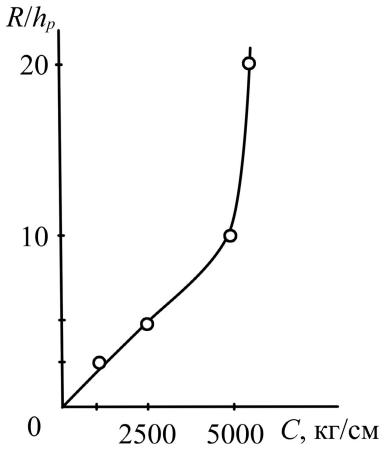


Рис. 3 – Зависимость $R/h_p \sim C$

3 Теоретические предпосылки

Резинометаллические детали машин представляют собой достаточно массивные элементы, выполненные из наполненных резин, в связи с чем, их жесткостные и диссипативные параметры определяются в результате решения связанной задачи нелинейной термовязкоупругости.

Методика расчета жесткостных и диссипативных параметров элементов строится в результате осуществления следующих этапов исследований:

1) выбор наиболее удобных для исследований механических характеристик, через которые достаточно просто могут быть выражены жесткостные параметры низкочастотных вибросейсмоблоков. Такими параметрами являются введенные и обоснованные [25, 27] коэффициенты жесткости типа $\tilde{\beta}$ (в общем случае комплексные: $\tilde{\beta}_n = \beta' + i\beta''$; $\tilde{\beta}_\tau = \beta'_\tau + i\beta''_\tau$; индексы n, τ отвечают соответственно сжимающим и сдвигающим усилиям, $(\cdot)'$ и $(\cdot)''$ – характеризуют модули накопления и потерь);

2) решения связанной задачи нелинейной термовязкоупругости и расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) для заданных конфигураций элементов с целью определения их характеристик в заданном диапазоне изменения геометрических размеров, частот и амплитуд нагружения;

3) обобщение полученных результатов и построение приближенных соотношений для расчета жесткостных характеристик элементов путем использования установленных закономерностей; оценка их точности.

Ниже последовательно излагаются основные положения и предпосылки, необходимые для реализации указанных этапов исследования цилиндрических (сплошных и полых) резинометаллических элементов.

При решении первой задачи водятся параметры жесткости $\tilde{\beta}$ аналогично параметрам жесткости в линейной теории упругости [25-27] по формулам:
для цилиндрических элементов сжатия $|z| \le h, \quad R_0 < r < R$

$$\tilde{\beta}_n = 2\left(R^2 - R_0^2\right)^{-1} \int_{R_0}^{R} \frac{r\tilde{\sigma}_{zz}(r,h)dr}{E_0\varepsilon_0}; \quad (1)$$

для цилиндрических элементов при сдвиге вдоль оси *OX* на величину u_{0X}

$$\tilde{\beta}_\tau = \frac{1}{S}\int_S \frac{t_x dS}{G_0\gamma_0}, \quad t_x = \sigma_{zr}\cos\theta' - \sigma_{z\theta}\sin\theta', \quad (2)$$

где индексы n, τ отвечают соответственно сжимающим и сдвигающим усилиям;
S – площадь приложения нагрузки;
G_0, E_0 – некоторые отсчетные модули:

$$G_0 = \tilde{G}_L(\omega,\theta_0), \quad E_0 = \tilde{E}_L(\omega_0,\theta_0),$$
$$\varepsilon_0 = u_0(y,z)/h, \quad \gamma_0 = u_{0x}/h.$$

Параметры типа $\tilde{\beta}$ являются самыми удобными для исследований. Они безразмерны, при фиксированном значении коэффициента Пуассона ν зависят только от геометрии элемента и являются его универсальной характеристикой. Коэффициенты $\tilde{\beta}$ дают исчерпывающую информацию о механическом поведении элементов, поскольку в полной мере характеризуют кажущиеся модули накопления и потерь

$$\tilde{E}_k = \tilde{\beta}_n E_0, \ \tilde{G}_k = \tilde{\beta}_\tau G \quad \text{или} \quad E_k^{',''} = \beta_n^{',''} E_0, \ G_k^{',''} = \beta_\tau^{',''} G_0, \quad (3)$$

определяют коэффициенты жесткости элементов в зависимости от амплитуды нагружения через амплитудно-зависимые модули $\tilde{E}_k$, $\tilde{G}_k$

$$\tilde{C}_n = \tilde{E}_k \cdot S/H, \quad \tilde{C}_\tau = \tilde{G}_k \cdot S/H. \quad (4)$$

Коэффициенты $\tilde{\beta}$, включая в себя также информацию о конструкционном выполнении элементов, являются, таким образом, конструктивно-деформационным параметром, характеризующим деформационные свойства элементов.

В работах [25, 27] проведено обоснование универсальных параметров типа $\tilde{\beta}$ как объектов исследования, однозначно определяющих все характеристики элементов (силовые и диссипативные) при циклическом деформировании.

При решении второй задачи – определении НДС в элементах используются допущения, соответствующие условиям эксплуатации и общепринятым физическим представлениям о резине, как о конструкционном материале: при циклическом нагружении в элементах реализуется простое (монофазное) деформированное состояние, элементы рассматриваются как изотропные нелинейно-вязкоупругие тела в форме цилиндра $R_0 \le r \le R$, $|z| \le h$ подверженные кинематическому возбуждению по торцам $z = \pm h$. Боковые поверхности свободны от нагрузки. На поверхности элементов осуществляется теплообмен по закону Ньютона, амплитуды внешних нагрузок, температура и параметры, характеризующие старение материала, являются медленно изменяющимися функциями времени т.е. их колебаниями в течение периода можно пренебречь.

При сделанных допущениях математическая постановка задачи формулируется в терминах амплитуд механических полей [18]: перемещений $\tilde{u}_{0i}(\bar{t},)$, деформаций $\tilde{\varepsilon}_{ij}(\bar{x},t)$, напряжений $\tilde{\sigma}_{ij}(\bar{x},t)$ и усредненной за период колебаний температуры θ имеет тот же вид, что и в линейной вязкоупругости и включает следующие уравнения:

$$\tilde{\sigma}_{ij} = 0, \quad c\dot{\theta} = k\left(\theta_{,i}\right)_{,i} + \bar{D}', \quad (5)$$

$$\tilde{\sigma}_{ij} = 2\tilde{G}\left(\tilde{\varepsilon}_{ij} + \frac{\nu}{1-2\nu}\tilde{\varepsilon}_{kk}\delta_{ij}\right), \quad \tilde{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2}\left(\tilde{u}_{ij} + \tilde{u}_{ji}\right), \quad (6)$$

$$\bar{D}' = \frac{\omega}{2}\left(\sigma_{ij}''\varepsilon_{ij}' - \sigma_{ij}'\varepsilon_{ij}''\right), \quad i,j = 1,2,3, \quad (7)$$

где $(\tilde{\bullet}) = (\bullet)' + i(\bullet)''$ – комплексная амплитуда;

c и *k* – коэффициенты объемной теплоемкости и теплопроводности;

$\tilde{G}$ и ν – модуль сдвига и коэффициент Пуассона;

$\tilde{\sigma}_{ij}$, $\tilde{u}_{ij}$ – компоненты тензоров напряжений и перемещений;

ω – частота нагружения.

Нагружение рассматриваемых цилиндрических элементов характеризуется следующими граничными условиями:

при сжатии $|z| \le h, \quad R_0 < r < R$

$$\begin{aligned} &\tilde{u}_z = \pm u_{0z}, \quad \tilde{u}_r = 0, \quad z = \pm h, \\ &\tilde{\sigma}_r = 0, \quad \tilde{\sigma}_{rz} = 0, \quad r \in [R_0, R]; \end{aligned} \tag{8}$$

при сдвиге вдоль оси *OX* на величину u_{0X}

$$\begin{aligned} &\tilde{u}_{rr} = u_{0x}\cos\theta, \quad \tilde{u}_{\theta\theta} = -u_{0x}\sin\theta, \quad u_{zz} = 0 \qquad z = h \\ &u_{rr} = \tilde{u}_{\theta\theta} = \tilde{u}_{zz} = 0, \qquad\qquad z = -h \\ &\tilde{\sigma}_{rz} = \tilde{\sigma}_{rr} = \tilde{\sigma}_{r\theta} = 0; \qquad\qquad r \in [R_0, R] \end{aligned} \tag{9}$$

тепловые граничные условия

$$\begin{aligned} &\theta_{,z} \pm \alpha_1 k^{-1}(\theta - \theta_c) = 0, \quad z = \pm h, \\ &\theta_{,r} \pm \alpha_2 k^{-1}(\theta - \theta_c) = 0, \quad r \in [R_0, R]. \end{aligned} \tag{10}$$

Здесь α_1, α_2 – коэффициенты теплоотдачи. Начальное распределение температуры дается равенством

$$\theta(x_i, 0) = \theta_0(x_i). \tag{11}$$

В принятых соотношениях $\theta_0(\vec{x}, t)$, $\tilde{u}_{0i}(\vec{x}, t)$ – медленно изменяющиеся функции времени и амплитуд.

Зависимость комплексного модуля сдвига от температуры, частоты и амплитуды деформации на основании экспериментальных данных [18, 19, 22] имеет вид

$$\tilde{G} = \tilde{G}(\omega, \theta, e) = G_L^{',''}(\omega, \theta) F^{',''}(e), \tag{12}$$

где $G_L^{',''}(\omega, \theta)$ – модули сдвига линейной теории вязкоупругости, отвечающие очень малым деформациям ε = 0,5 % [2, 3, 5];

e – интенсивность амплитуды девиатора деформации;

$$\begin{aligned} &e = \left(e'_{ij} \cdot e'_{ij} + e''_{ij} \cdot e''_{ij}\right)^{\frac{1}{2}}, \\ &\tilde{e}_{ij} = \tilde{\varepsilon}_{ij} - \frac{1}{3}\varepsilon_{kk}\delta_{ij}, \quad |\tilde{\varepsilon}| = \left(\varepsilon'^2_{ij} + \varepsilon''^2_{ij}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad \tilde{\varepsilon} = \tilde{\varepsilon}_{kk}; \end{aligned} \tag{13}$$

$F^{',''}$ – функции, удовлетворяющие условиям $F'(0) = F''(0) = 1$.

При конкретизации функций $F^{',''}$ использованы экспериментальные зависимости $G^{',''}$ от амплитуды деформаций сдвига – классические существенно нелинейные зависимости Пейна для наполненных резин.

Объемное поведение материала моделируется гипотезой $\tilde{\nu} = \nu' = \text{const} = 0{,}495$, что характерно для элементов из слабосжимаемых эластомеров с достаточно развитой свободной поверхностью.

Расчет $\tilde{\beta}$ производятся по формулам (1)-(2) путем решения задачи (5)-(12) методом типа переменных параметров упругости в сочетании с МКЭ при конкретизации (9), (10), (12) свойствами модельной резины [18, 26], обладающей существенной нелинейностью в области малых деформаций ($0 \le \gamma \le 0{,}15$). Значения геометрических размеров варьируются в пределах $0{,}2 \le y = h/\ell \le 1$; $0{,}2 \le z_0 = h/R \le 1$. Данные экспериментальных

исследований (12) обобщаются на случай многоосной деформации с помощью соотношения $e = \gamma / \sqrt{2}$ [3, 9]

$$F^{',''}(e) = G^{',''}\left(\sqrt{2}e\right) \Big/ G_L^{',''} . \tag{14}$$

На третьем этапе исследований выполнялось обобщение полученных результатов расчета напряженно-деформированного состояния элементов, установлены закономерности поведения их механических характеристик при циклическом деформировании. Установлено, что их зависимость от амплитуды деформации и соотношения размеров выражается посредством единого параметра – среднеобъемной интенсивности амплитуд деформаций [25, 27]. Для коэффициентов $\tilde{\beta}$ построены справочные таблицы [25, 27] и их аппроксимационные формулы, которые справедливы для силовых элементов базовых форм с достаточно развитой формой свободной поверхности при сдвиге, сжатии, комбинированном нагружении сдвиг – сжатие.

Обобщение выполнялось на основе интегральной математической модели [25], позволяющей выразить жесткостные и механические характеристики вибросейсмоблоков посредством конечных аналитических выражений через единый параметр – среднеобъемную интенсивность амплитуд деформации $\overline{e}$, а коэффициенты $\tilde{\beta}$ через коэффициенты $\tilde{\beta}_0$, линейной теории вязкоупругости ($F^{',''}(0) = 1$, $\operatorname{tg}\delta_0 = G''/G'_0$, $\tilde{G} = G_0$) по формулам

$$\beta_n^{',''} = 2(1+\nu)\beta_{on} G_L^{',''}(\omega, \theta_0) F^{',''}(\overline{e}) / G, \tag{15}$$

$$\beta_\tau^{',''} = \beta_{o\tau} G_L^{',''}(\omega, \theta_0) F^{',''}(\overline{e}) / G_0, \tag{16}$$

Среднеобъемная интенсивность $\overline{e}$ в элементах в зависимости от вида нагружения и геометрии элементов определяется по формулам:
при произвольном комбинированном нагружении

$$\overline{e} = \left[\varepsilon_{0x}^2 \beta_{0\tau} + 2\left(1+\nu\right)\beta_{0n}\varepsilon_{0y}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \tag{17}$$

при комбинированном нагружении с одной фазой возбуждения (угол приложения нагрузки равен φ)

$$\overline{e} = \frac{u_0}{H}\left(\beta_{on}\cos^2\varphi + \frac{\beta_{o\tau}}{2\left(1+\nu\right)}\sin^2\varphi \right); \tag{18}$$

при сжатии и сдвиге соответственно

$$\overline{e} = \varepsilon_{0y}\sqrt{\left(1+\nu\right)\beta_{0n}}, \quad \overline{e} = \varepsilon_{0x}\sqrt{\frac{\beta_{0\tau}}{2}}, \tag{19}$$

где u_0 – смещение элемента в направлении действия силы;
$H = 2h$.

Коэффициенты жесткости $\tilde{C}_n$ и $\tilde{C}_\tau$ рассчитываются согласно (4). Все остальные частные случаи гармонического нагружения описываются зависимостями типа (15), (16), при этом при комбинированном нагружении с фиксированной фазой возбуждения согласно [30 , 31]

$$\beta^{',''} = \beta_0 G^{',''}\left(\omega, \theta_0, \overline{e}\right), \quad E_k^{',''} = 2\left(1+\nu\right)\beta_0 G^{',''}\left(\omega, \theta_0, \overline{e}\right) \tag{20}$$

$$\beta_0 = \beta_{0n}\cos^2\varphi + \frac{\beta_{0\tau}}{2\left(1+\nu\right)}\sin^2\varphi, \quad \overline{e} = \overline{\varepsilon}_0\left[\left(1+\nu\right)\beta_0\right]^{\frac{1}{2}} \tag{21}$$

где $\overline{\varepsilon}_0 = u_0 / H$ – амплитуда перемещения;
u_0 – угол между направлением действующей силы и нормалью к поверхности торца.

Коэффициенты $\beta_{0\tau}$, β_{0n} для сплошных цилиндрических элементов определяются по формулам [25, 27, 30]

$$\beta_{0\tau} = 1 - \frac{h}{2D}, \tag{22}$$

$$\beta_{0n} = 1{,}05 + \frac{1}{16} \cdot \frac{D^2}{h^2}, \quad D \geq 2h, \tag{23}$$

Для полых цилиндрических элементов [24]

$$\beta_{0\tau} = \left[1 + \left(0{,}336 + 1{,}15\varepsilon_0^{1{,}72} \right) \cdot z_0^{1{,}16} \right]^{-1},$$

$$\varepsilon_0 = \frac{R_0}{R}, \qquad z_0 = \frac{h}{R}, \tag{24}$$

$$1 \leq z_0^{-1} \leq 10, \quad 0 \leq \varepsilon_0 \leq 0{,}5,$$

где $2h$ – высота РД;

R_0, R – внутренний и внешний радиусы РД;

D – диаметр элемента.

В интервале $1 \leq z_0 \leq 10$ и $0 \leq \varepsilon_0 \leq 0{,}5$ погрешность (24) не превышает 4 %, а для $\varepsilon_0 = 0{,}7$ – не более 8 %. Уменьшение значения $\beta_{0\tau}$ для сравнительно высоких элементов объясняется изгибом, проявляющимся с увеличением относительной высоты h/R_0 [25].

Расчет жесткостных параметров вибросейсмоблоков с учетом эффектов объемного сжатия производится по формуле [18]

$$\beta = \frac{\tilde{E}_k}{\tilde{E}} = \frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu) + 15{,}42\nu(1 - \nu)y_0^2}, \tag{25}$$

где $\tilde{E}$ и $\tilde{E}_k$ – истинный и кажущийся модули Юнга;

$y_0 = h_p/R$ (h_p– толщина резинового слоя, R – радиус цилиндра).

Из (25) вытекает предельное равенство для элементов малой толщины в виде

$$\lim_{y_0 \to 0} = \frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}. \tag{26}$$

Осюда следует, что при уменьшении толщины слоя резины жесткость элемента стремится к некоторому предельному значению, в частности

$$\tilde{E}_k \cong \frac{E}{3(1 - 2\nu)} = K, \tag{27}$$

где K – модуль объемного сжатия.

При $\nu \cong 0{,}5$ напряженное состояние в тонкослойных элементах близко к всестороннему сжатию. Известно, что особенностью поведения резины в этом случае является существенный рост коэффициента жесткости при уменьшении толщины.

Область применения приближенных соотношений (22)-(25):

$z_0 \geq 0{,}2$ с погрешностью менее 10 % при сжатии и

$z_0 \leq 0{,}8$ с погрешностью менее 2 % при сдвиге.

4 Алгоритм расчета жесткостных параметров вибросейсмоблоков

Исходными данными для расчета являются грузонесущие, жесткостные и деформационные характеристики, которыми должен обладать рассчитываемый виброизолятор, а также упругие характеристики резины. В качестве исходных данных можно выбрать следующие шесть величин: грузонесущую способность Q, вертикальную деформацию под нагрузкой ε, вертикальную жесткость на сжатие $C_в$, горизонтальную жесткость или жесткость на сдвиг $C_г$, модуль сдвига резины G и коэффициент Пуассона ν. В

ряде случаев вместо жесткостей $C_в$ и $C_г$ удобно использовать условные собственные частоты $\omega_в$ и $\omega_г$ вертикальных и горизонтальных колебаний, соответственно:

$$\omega_в = \sqrt{\frac{g \cdot C_в}{Q}}; \quad \omega_г = \sqrt{\frac{g \cdot C_г}{Q}}, \tag{28}$$

где g = 9,81 м/с^2 – ускорение свободного падения;

Q – вертикальная сила (вес груза), действующая на виброизолятор.

Основные соотношения, определяющие жесткости виброизолятора, имеют вид:

$$C_в = E_к \frac{\pi \cdot D^2}{4n \cdot h_p}; \quad C_г = G_к \frac{\pi \cdot D^2}{4n \cdot h_p} \tag{29}$$

где $E_к$ и $G_к$ – так называемые кажущиеся модули растяжения и сдвига соответственно.

Величины $E_к$ и $G_к$ отличаются от истинных модуля растяжения E и модуля сдвига G и являются функциями упругих характеристик резины и размеров резинового слоя:

$$E_к = E_к\left(G, B, D, h_p\right); \quad G_к = G_к\left(G, B, D, h_p\right) \tag{30}$$

Знание этих функций позволяет на основании формул (1) и (2) произвести расчет всех необходимых величин.

В ИГТМ НАН Украины имеется полная методика расчета эластомерных блоков, включающая в себя выбор параметров и прогнозирование срока службы с учетом старения резины. Ресурс работы сейсмоизоляторов по предварительной оценке составляет не менее 50 лет.

В соответствии с [1] алгоритм расчета вибросейсмоблоков включает следующие этапы:

1) Для заданной собственной частоты горизонтальных колебаний ω_0 строительной конструкции и ее массы M определяется горизонтальная жесткость системы сейсмозащиты:

$$C_{0г} = M\omega_0^2. \tag{31}$$

2) Вертикальная жесткость системы:

$$C_{0в} = 6C_{0г}. \tag{32}$$

3) Вертикальная статическая жесткость системы:

$$C_{ст.в} = \frac{C_{0в}}{K}, \tag{33}$$

где K – коэффициент динамичности, который зависит от принимаемой марки резины.

4) Статическая вертикальная жесткость опоры

$$C'_{ст.в} = \frac{C_{ст.в}}{n}, \tag{34}$$

где n – количество опор.

5) Вертикальная деформация всей системы:

$$\Delta = \frac{Mg}{C_{ст.в}}, \tag{35}$$

где g – ускорение свободного падения.

6) Высота H резинового слоя одной опоры:

$$H = \Delta / [\gamma], \tag{36}$$

где $[\gamma]$ – допустимая относительная деформация резины в опоре.

7) Вертикальная жесткость одного виброизолятора в опоре:

$$C_1 = \beta \frac{\pi R^2 E}{h}, \tag{37}$$

где β – коэффициент увеличения жесткости виброизолятора, который зависит от его геометрических размеров и условий закрепления на торцах;

R – радиус виброизолятора;

h – высота виброизолятора;

E – условно-равновесный модуль резины на сжатие.

8) Определяются линейные параметры β_{0n} и $\beta_{0\tau}$ в зависимости от геометрии элементов, марки резины и условий эксплуатации по приведенным аппроксимационным формулам или таблицам [30].

9) Определяется среднеобъемная интенсивность $\overline{e}$ в элементах в зависимости от вида нагружения и их геометрии по формулам (17)-(19).

10) Вычисляются экспериментальные зависимости $G^{',''}(\gamma)$ при $\gamma = \overline{e}\sqrt{2}$ и с их использованием жесткостные параметры типа $\tilde{\beta}$ по формулам (15)-(16).

11) Коэффициенты жесткости $\tilde{C}_n$ и $\tilde{C}_\tau$ рассчитываются согласно (4).

Статические и динамические испытания РСБ подтвердиили соответствие их расчетных характеристик, полученных в ходе испытаний.

Выводы.

1. Анализ мировой практики вибросейсмозащиты зданий и сооружений показывает, что наиболее перспективными с точки зрения стоимости и эффективности являются системы с использованием резинометаллических конструкций.

2. Разработанные и испытанные конструкции сейсмоопор могут быть использованы для сейсмозащиты жилых домов и обеспечить собственную частоту строения в горизонтальной плоскости порядка 1 Гц. При этом жесткость в вертикальной плоскости достаточна для гашения вертикальных колебаний.

3. Данные сейсмоопоры с большой эффективностью могут быть использованы для защиты зданий и сооружений от воздействий железнодорожного транспорта, метро неглубокого залегания, а также для виброизоляции тяжелых машин различного технологического назначения.

4. Разработанный в ИГТМ (совм. С ИМ, г. Киев) оригинальный β-метод является практически единственным действующим инструментом, учитывающим положение на торцах при расчете резиновых и резинометаллических вибросейсмоблоков.

5. На основе разработанного β-метода создана методика расчета цилиндрических сплошных и полых деталей, служащих элементами вибросейсмоблоков, используем их для защиты машин и сооружений от динамических и ударных нагрузок.

Внедрение РСБ существенно снизит влияние землетрясений на сооружения, и поэтому мы ожидаем следующее:

- Значительно расширится выбор строительных площадок;
- Снизится стоимость строительных работ;
- Станет возможным унифицировать проектируемые сооружения;
- Улучшатся технологические характеристики сооружений;
- Повысятся безопасность и надежность сооружений;
- Будут созданы предпосылки для использования новых технологий.

В научном смысле это позволит более глубоко понять природу влияния землетрясений на сооружения и разработать новые способы их защиты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дырда, В.И. Обоснование и выбор параметров резинометаллических сейсмоопор [Текст] / В.И. Дырда, Н.И. Лисица, Н.Г. Марьенков, Т.Е. Твердохлеб, Е.Ю. Заболотная, Н.Н. Лисица, Н.В. Тымко // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. трудов / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2009. – Вып. 84. – С. 17-23.
2. Булат, А.Ф. Вибросейсмозащита машин и сооружений с помощью резиновых блоков [Текст] / А.Ф. Булат, В.И. Дырда, Ю.И. Немчинов, Н.И. Лисица, Н.Н. Лисица, Н.В. Тымко // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. трудов / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2010. – Вып. 85. – С. 128-132.
3. Немчинов, Ю.И. Сейсмостойкость зданий и сооружений: в двух частях [Текст] / Ю.И. Немчинов. – Киев, 2008. – 480 с.

4. Яременко, В.Г. Современные системы защиты зданий и сооружений от землетрясений [Текст] / В.Г. Яременко. – Киев: Общество «Знание», 1990. – 19 с.
5. Казина, Г.А. Современные методы сейсмозащиты зданий и сооружений [Текст]: Обзор / Г.А. Казина, Л.Ш. Килимник. – М.: ВНИИИС, 1987. – 66 с.
6. Поляков, С.В. Последствия сильных землетрясений [Текст] / С.В. Поляков. – М.: Стройиздат, 1978. – 311 с.
7. Землетрясение – уроки и проблемы [Текст] // Природа. – 1989. – № 12. – С. 3-115.
8. Eiginger, J.M. Seismic isolation for nuclear power plants: technical and nontechnical aspects in decision making / J.M. Eiginger, J.M. Kelly // Nuclear Engineering and Design 84. – 1985. – Pp. 383-409.
9. Поляков, С.В. Современные методы сейсмозащиты зданий и сооружений [Текст] / С.В. Поляков, Л.Ш. Килимник, А.В. Черкашин. – М.: Стройиздат, 1989. – 320 с.
10. Поляков, С.В. Опыт возведения зданий с сейсмоизолирующим поясом в фундаменте [Текст] / С.В. Поляков, Л.Ш. Килимник, Л.Л. Солдатова. – М.: Стройиздат, 1983. – 32 с.
11. Руководство по проектированию виброизоляции машин и оборудования [Текст]. – М.: Стройиздат, 1972. – 160 с.
12. Шишков, Ю.А. Сейсмостойкость объектов: причины разрушений, проблемы, надежность [Текст] / Ю.А. Шишков // Проектирование и строительство в Сибири. – 2003. – № 5. – С. 58-66.
13. Дашевский, М.А. Виброзащита многоэтажных крупнопанельных зданий [Текст] / М.А. Дашевский, В.В. Моторин, Е.М. Миронов // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2001. – № 4. – С. 47-50.
14. Булат, А.Ф. Анализ риска и система сейсмоизоляции сооружений при чрезвычайных ситуациях природно-техногенного характера [Текст] / А.Ф. Булат, В.И. Дырда // Материалы научно-практической конференции «Проблеми прогнозування та попередження надзвичайних ситуацій природного, природно-техногенного та техногенного походження». – Одесса, 2008. – С. 47-48.
15. Немчинов, Ю.И. Экономическая целесообразность научно-технического сопровождения объектов экспериментального строительства [Текст] / Ю.И. Немчинов, А.К. Хавкин, Н.Г. Марьенков, Н.П. Ивлева, В.И. Дырда, Н.И. Лисица // Будівельні конструкції. Будівництво в сейсмічних районах України. – Київ: ПП «ППНВ». – 2008. – Вип. 69. – С. 143-149.
16. Лисица, Н.И. Опыт применения эластомерных конструкций для виброизоляции дробилок [Текст] / Н.И. Лисица // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. трудов / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск: Авантаж. – 2007. – Вып. 70. – С. 149-155.
17. Дашевский, М.А., Виброзащита многоэтажных крупногабаритных зданий [Текст] / М.А. Дашевский, В.В. Моторин, Е.М. Миронов // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2001. – № 4. – С. 47-50.
18. Потураев, В.Н. Прикладная механика резины. [Текст] / В.Н. Потураев, В.И. Дырда, И.И. Круш. – Киев: Наук.думка, 1980. – 260 с.
19. Дырда, В.И. Прочность и разрушение эластомерных конструкций в экстремальных условиях. [Текст] / В.И. Дырда. – Киев: Наук. думка, 1988. – 232 с.
20. Термомеханика эластомерных элементов конструкций при циклическом нагружении [Текст] / В.Н. Потураев, В.И. Дырда, В.Г. Карнаухов, И.К. Сенченков, В.И. Козлов, А.В. Мазнецова – Киев: Наук. думка, 1967. – 268 с.
21. Payne, A.R. Histeresis in rubber vulcanisates // 117 Polim. Sci. Symp. – 1974. – N 48. – Pp. 169-106.
22. Dean, G.D. Determination of nonlinear dynamic properties of carbon-filled rubber / G.D. Dean, J.C. Duncan, A.F. Jonson // Polym. Test. – 1984. – № 4. – Pp. 225-249.
23. Дырда, В.И. Особенности квазистатических расчетов металлорезиновых систем / В.И. Дырда, Т.Е. Твердохлеб, М.К. Шолин // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. трудов. – Днепропетровск. – 2003. – Вып. 43. – С. 146-187.
24. Расчет слоистых резинометаллических виброизоляторов / В.И. Дырда, Г.Н. Голуб, А.В. Мазнецова, М.В. Мажаров; ИГТМ АН Украины. – Днепропетровск, 1989. – 11 с. – Деп. в ВИНИТИ 22.11.89, № 6987-В89.
25. Мазнецова, А.В. Разработка прикладных методов расчета силовых резиновых деталей горных вибрационных транспортных машин: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06 [Текст] / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск. – 1990. – 17 с.
26. Расчет стационарных колебаний и диссипативного разогрева нелинейных вязкоупругих тел при периодическом нагружении [Текст] / И.К. Сенченков, В.И. Дырда, В.И. Козлов, О.П. Терещенко, А.Б. Мазнецова // Прикладная механика. – 1986. – 22, № 6. – С.49-55.
27. Универсальный конструкционно-деформационный параметр и β-метод в механизме деформирования резиновых деталей [Текст] / В.И. Дырда, И.К. Сенченков, А.В. Мазнецова, Т.Е. Твердохлеб // Тр. II Международного симпозиума по механике эластомеров, июнь 1997 г. – Днепропетровск: Полиграфист, 1997. – С. 204-234.
28. Дырда, В.И. Исследование закономерностей деформирования и разрушения ЭЭК при статическом разрушении [Текст] / В.И. Дырда, А.С. Кобец, Т.Е. Твердохлеб // Геотехническая механика. – Днепропетровск: Авантаж. – 2006. – Вып. 63. – С. 111-118.
29. Булат, А.Ф. Анализ риска и система сейсмоизоляции сооружений при чрезвычайных ситуациях природно-техногенного характера [Текст] / А.Ф. Булат, В.И. Дырда // Материалы научно-практической конференции «Проблеми прогнозування та попередження надзвичайних ситуацій природного, природно-техногенного та техногенного походження» – Одесса, 2008. – С. 47-48.
30. Сенченков, И.К. Справочные коэффициенты жесткости призматических и цилиндрических виброизоляторов при сжатии и сдвиге [Текст] / И.К. Сенченков, А.Ю. Шевченко, А.В. Мазнецова // Вопросы динамики и прочности. – 1987. – Вып. 48. – С. 23-28.