

## ВИБРОИЗОЛЯТОРЫ ДЛЯ ДИЗЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК И ИХ ЭЛЕМЕНТОВ

*М.А. Минасян, д.т.н; А.М. Минасян, студент  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет*

Вибрации и удары сопутствуют работе ДВС, снижая их надежность и долговечность. Вибрация приводит к индуцированию шума, являющегося важным экологическим показателем среды обитания человека. Среди методов и средств борьбы с вибрацией дизельных установок и их элементов используются средства виброизоляции.

Высокоэффективные канатные и комбинированные виброизоляторы могут успешно применяться не только в качестве опорных, но и неопорных упругих связей (муфт, подвесок и т. п.).

При невозможности свести уровень шума и вибрации в источнике до установленных норм используются конструктивные методы борьбы с шумом и вибрацией на путях их распространения. Главная из этих мер — введение упругого (податливого) элемента между рамой (или лапами крепления) двигателя и фундаментом (или корпусной конструкцией). Такого типа крепления включают собственно виброизоляторы и промежуточные металлоконструкции. Основное назначение такого крепления и включенных в него виброизоляторов состоит в обеспечении виброизоляции, противоударной защиты, одновременно как виброизоляционной, так и противоударной защиты и антивибрационной защиты оборудования от воздействия интенсивной низкочастотной вибрации, приходящей от корпусных опорных конструкций [1].

Проблемы виброзащиты возникают практически во всех областях современной техники и их решение существенно опирается на специфику системы или реализуемого динамического процесса. Средства виброизоляции среди всех методов и средств борьбы с вибрацией не только дизельных установок и их элементов, но и любых объектов техники по эффективности находятся на первом месте.

В качестве материала упругих элементов используют различные полимеры, пластмассы, резины, металлы и их сплавы, цельнометаллические упругодемпфирующие элементы (УДЭ) из прессованной нержавеющей проволоки, предварительно навитой в спираль (МР), стальные

канаты, металлическую пыль, а также пробку, войлок, жидкости и газы [1, 2].

По материалу упругого элемента виброизоляторы делятся на резиновые, резинометаллические, пружинные, сетчатые (из материала МР), канатные (тросовые), пневматические, жидкостные и комбинированные.

Выбор материала упругого элемента только внешне может показаться несложной операцией. Скрупулезный учет характерных свойств и особенности материала в сопоставлении с требованиями, которые предъявляются к конкретной виброзащитной системе, выявляет всю сложность проблемы выбора, особенно если проектировщик интересуется не только видом материала, но и его качество. Первым шагом к обоснованному выбору материала должен стать анализ его характерных особенностей. Опыт подсказывает, что вещи, содержащие свободные и гибкие соединения, такие как одежда, плетеные корзины, более долговечны, поскольку часть упругой энергии расходуется на трение. Поэтому по структуре стальной канат является одним из наиболее подходящих материалов, используемых в качестве упругих элементов виброизоляторов (табл. 1). В связи с этим представляется оптимальным использование их в условиях вероятного воздействия различных агрессивных сред и в других специфических условиях эксплуатации [1–3].

В известных конструкциях упругие элементы представляют систему коротких криволинейных стержней, выполненных из одного или нескольких отрезков троса с закрепленными или свободно скользящими концами, помещенными в опорные элементы (рис. 1, 2). Каждый упругий изолирующий элемент имеет свои характеристики, определяемые диаметром каната, количеством жил, длиной троса и степенью его скрученности, количеством витков, полувитков (или отрезков) в элементе, а также формой упругого элемента в целом и его пространственной ориентацией.

Рабочие части отрезков троса обладают требуемой несущей способностью и большим демпфированием. В процессе нагружения они испытывают деформации изгиба, кручения, сжатия и растяжения. Упругие элементы канатных и комбинированных виброизоляторов имеют

## Сравнительные свойства упругих элементов виброизоляторов

Вид материала	Работоспособность			Обеспечение собственных частот		Способность нести нагрузки		Степень деформирования	Стойкость		Долговечность
	Сжатие	Растяжение	Сдвиг	Менее 10 Гц	От 10 до 30 Гц	Малые нагрузки	Высокая интенсивность		К коррозии и растворителям	К высоким температурам	
Эластомеры	О	Х	Х	У	О	О	Х	Х	Х	У	У
Пружины стальные	О	О	П	О	О	О	О	О	О	О	О
Металлическая резина (путанка)	О	П	П	П	Х	Х	О	О	О	О	О
Металлическая сетка или пористый металл	О	П	П	П	Х	Х	О	О	О	О	О
Стальной канат (трос)	Х	Х	Х	О	О	О	Х	О	О	О	Х
Стальной канат с пружиной	О	О	О	О	О	О	О	О	О	О	О
Композитные полимерные материалы	Х	Х	П	У	Х	О	У	У	Х	Х	Х
Пневматические оболочки	О	У	У	О	-	П	О	У	У	У	У
Магнитожидкостные элементы	Х	Х	П	У	Х	О	П	Х	У	П	П

Примечание: О — отлично; Х — хорошо; У — удовлетворительно; П — плохо.

форму цилиндра (рис. 1, *v, w, x*); тора (рис. 1, *a-e, h-k, p*); квазисферы (рис. 1, *s, z*); гиперболы (рис. 1, *i, m, n, o*) и т. п. и выполнены из стального каната, а опорные элементы имеют форму фланца (рис. 1, *a, b, d, e, h-k, m-u, y-β*); кольца (рис. 1, *c, e*); полукольца (рис. 1, *f*); пластины (рис. 1, *g, l, v, w, x*) и т. п.

Разработаны также комбинированные виброизоляторы, в которых конструктивно с тросом объединены упругие и демпфирующие элементы из различных материалов с параллельным, последовательным или смешанным соединениями (рис. 1, *b, d, r, s-u, w, z, β*), а также виброизоляторы с гиперболическими и торообразными упругими элементами, выполненные с дополнительным упругим элементом в виде бухты из стального каната (рис. 1, *t, y*).

Концы стального каната бухты (рис. 1, *y*) закреплены специальным хомутом для возможности изменения плотности и числа витков бухты, а следовательно, и характеристики виброisolатора.

Виброизоляторы, дополнительно сплетенные по горизонтальной плоскости опорных деталей, представлены на рис. 1, *s, u, w*.

Пружинно-канатные виброизоляторы представлены на рис. 1, *r, z*, а резиново-канатные — на рис. 1, *β*.

Канатные и комбинированные виброизоляторы (см. рис. 1) сочетают высокую несущую способность (охватывают диапазон статических нагрузок от 1 Н до 200 кН) с высокой податливостью при динамических воздействиях (их собственные частоты могут быть в пределах до 1 Гц).

Обладая свойством значительного допустимого динамического перемещения, канатные виброизоляторы эффективно гасят удары, а внутрен-

нее демпфирование обеспечивает поглощение и рассеяние большей части энергии низко- и высокочастотных колебаний. Внутреннее демпфирование происходит за счет трения между жилами троса по закону упругого гистерезиса, что особенно важно при резонансе.

При этом надежное гашение ударов и ослабление вибрации обеспечивается независимо от направления их действия. Работа канатных виброизоляторов характеризуется следующими особенностями: хорошо противостоят вибрационным и линейным перегрузкам; выдерживают многократные удары высокой интенсивности длительностью 0,05–0,1 с; имеют поглощающую способность, близкую к пружинным виброisolаторам, а по рассеивающей превосходят металлическую резину (МР); при самых худших условиях перемещение на 75 % свободного хода снижает удар до значений, обеспечивающих необходимую безопасность объекта; могут работать в различных климатических условиях; храниться в течение 10 и более лет.

Зарубежный опыт проектирования виброизолирующих систем [1] позволяет установить максимально допустимый диапазон ударных нагрузок от 15 до 25 g.

Виброизоляторы из стального каната практически не подвержены воздействию окружающей среды (изготовлены из нержавеющей стали). Они эффективно работают при температурах от –200 до +370 °С и не подвержены воздействию масла, грязи, песка, соляного тумана и т. д. Такая нечувствительность к агрессивным средам позволяет до минимума сократить трудозатраты на их техническое обслуживание. Обычно они имеют срок службы, сопоставимый со сроком службы самого изолируемого объекта.



Рис. 1. Канатные и комбинированные виброизоляторы

Разработанные приспособления, установки и стенды для испытания и исследования характеристик виброизоляторов, а также практическая их реализация представлены в работах [1–10].

Канатные и комбинированные виброизоляторы могут успешно применяться не только в качестве опорных [1–9], но и неопорных упругих связей [1, 7], например, подвесок трубопроводов и в качестве упругих муфт (рис. 1, *a–j*, *o–p*, *s–x*, *z*,  $\beta$ ).

Виброизоляторы, представленные на рис. 1, *j*, *v–x*, *z*,  $\beta$  можно использовать в качестве упругих элементов сборных муфт.

Средства и способы регулирования характеристик разработанных виброизоляторов пред-

ставлены в табл. 2 [1]. Некоторые основные примерные характеристики канатных и комбинированных виброизоляторов представлены в табл. 3. Данная таблица составлена на базе теоретических и экспериментальных исследований, а также известных научно-технических источников [1]. Представленные характеристики важны и необходимы для предварительного выбора возможных вариантов виброизолирующих конструкций и креплений.

Учитывая то, что требуемые номинальная статическая нагрузка и частота собственных колебаний виброизолятора легко определяются, так как масса и частота вращения виброизолируемого объекта известны, то с помощью табл. 2 можно предварительно выбрать возможные варианты виброизолирующих опорных и неопорных конструкций и креплений в начальной стадии проектирования виброизолирующей системы объектов.

При необходимости выбора регулируемого виброизолятора можно воспользоваться табл. 2 и рис. 1, 2. Номинальную статическую нагрузку  $P_z$  рекомендуется выбрать прежде всего исходя из индекса каната  $C$  и величины свободного хода нагруженного полукольца при условии отсутствия остаточной деформации полуколец и сохранения его максимально возможной живучести. Кроме того, при выборе номинальной статической нагрузки были учтены многолетний опыт экспериментальных исследований и применения упругих опорных и неопорных связей, в которых в качестве упругих элементов применяется стальной канат [1].

При выборе и расчете виброизоляторов наряду с основными исходными данными обычно учитываются особенности окружающей среды, так как они могут эксплуатироваться в условиях экстремальных температур, при воздействии различных веществ, таких как топливо, масло, частицы соли, органические растворители. Кроме того, к виброisolatorам часто предъявляются специфические требования, обусловленные особенностями изолируемых объектов и вибрационных воздействий. В частности, от виброизолирующей конструкции может потребоваться [1, 9]:

➤ способность воспринимать большие статические нагрузки (до 200 кН и более на один виброизолятор);

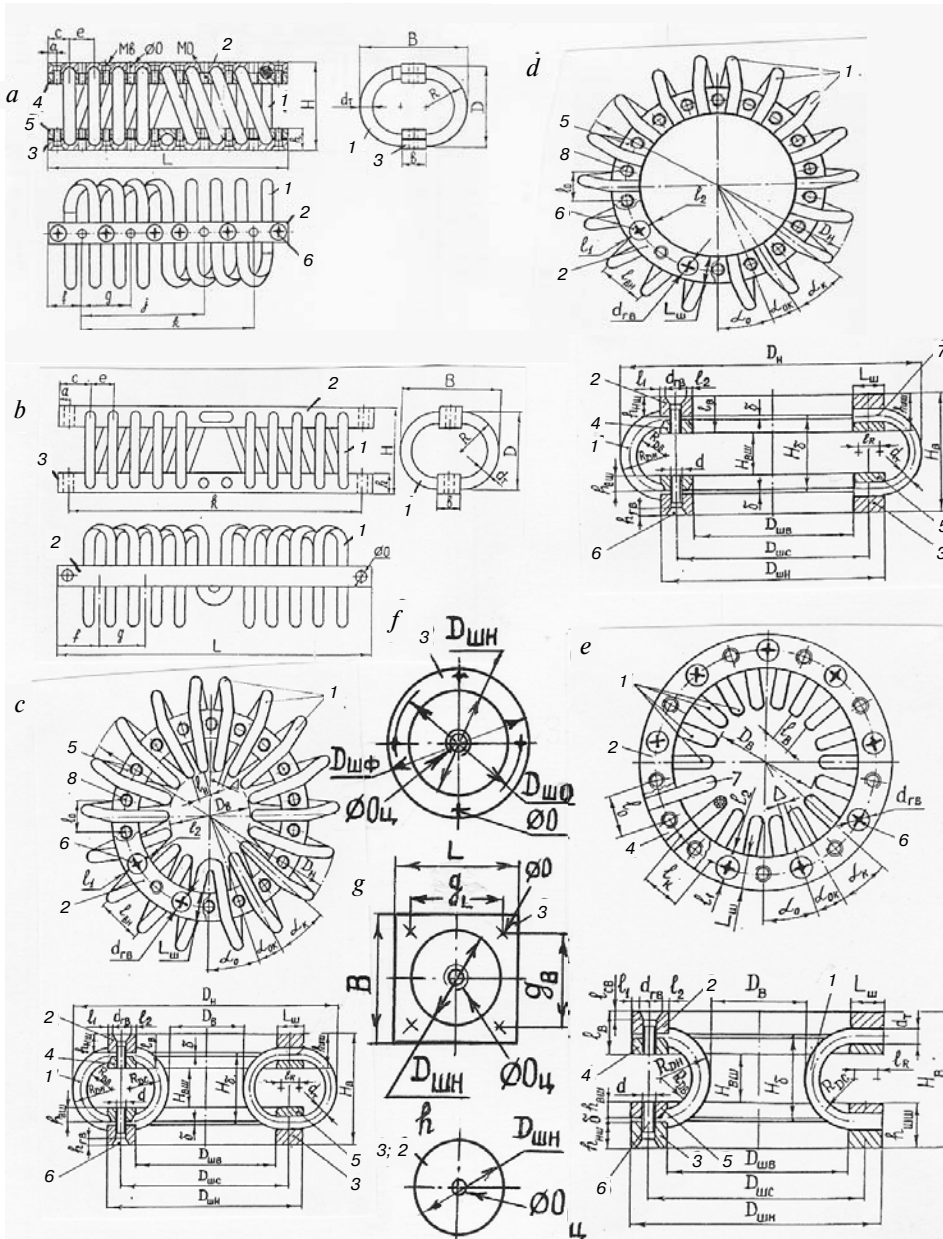


Рис. 2. Некоторые виды амортизаторов:

1 — упругий элемент амортизатора; 2, 3 — опорные пластины; 4, 5 — прижимные пластины; 6 — крепежные детали;  $L$ ,  $B$ ,  $H$  — длина, ширина и высота амортизатора;  $D$  — максимальный диаметр амортизатора  $\varnothing O$ ;  $O_{ц}$  — отверстие для крепления амортизатора;  $a$ ,  $b$  — цилиндрический тросовый амортизатор;  $c$  — торообразный тросовый амортизатор;  $d$  — круглый тросовый амортизатор с радиально-наружными полувитками троса;  $e$  — гиперболоидный тросовый амортизатор;  $f$  — опорная пластина 3 круглой формы с отверстиями  $\varnothing O$ ;  $g$  — опорная пластина 3 прямоугольной формы с отверстиями  $\varnothing O$

➤ технологичность при замене поврежденных виброизоляторов, что особенно важно для оборудования, устанавливаемого в помещениях ограниченных габаритов;

➤ эффективная виброизоляция в вертикальном, горизонтальном, продольном и траверзном направлениях;

➤ эффективная защита как от вибрации, так и от ударов;

➤ способность виброизоляторов выполнять свои функции при работе на сжатие, растяжение,

сдвиг, кручение вне зависимости от расположения в пространстве.

Конструкции виброизоляторов должны учитывать вероятность использования их в этих частных случаях, которые встречаются иногда в отдельности, но чаще в различных сочетаниях.

Расчет и разработка канатных и комбинированных виброизоляторов производится на основе результатов экспериментальных исследований. Результаты экспериментальных исследований для диаметров каната 13; 9,1; 6,2; 5,1; 2,6 и 2,2 мм, величины деформаций  $\delta_z$  полувитков исследуемых диаметров под действием номинальной статической нагрузки  $P_z$  представлены в [1].

Используя аналитическую формулу деформации полукольца  $\delta_z$  и его значение, полученное экспериментально, при одинаковом значении номинальной нагрузки предлагается следующая эмпирическая формула [1]

$$\delta_z = \frac{1,57 P_z R_B^3}{EJK_3}, \quad (1)$$

где  $K_3$  — эмпирический коэффициент поправки, зависящий от многих параметров, покрывающий все неизбежные недостатки в расчетах, связанные с методом расчета,

методикой исследования материала каната, имеющего специфическую сложную структуру, обладающего свойством конструктивной анизотропии, и многими другими факторами.

Эмпирические формулы деформации полувитка соответственно по осям  $Y$  и  $X$  [1]:

$$\delta_y = \frac{1,57 P_y R_B^3}{EJK_3}; \quad (2)$$

$$\delta_x = 7,69 \frac{P_x R_B^3}{EJK_3}. \quad (3)$$

Таблица 2

**Средства и способы регулирования характеристик виброизоляторов**

Средства и способы		Рисунок
Радиус витка, кольца, полукольца, дуги		1, $a-q, v, x$ 2, $a-e$
Число и особенность установки пружин	Свободно без зазора	1, $r, z$
	С зазором	1, $r, z$
	С натяжением	1, $r, z$
Болт крепления виброизолятора к виброизолируемому объекту		1, $b, r$
Шайбы		1, $b, r, z$
Плетение и плотность плетения		1, $s, u, w, y$
Намотка и плотность намотки		1, $y$
Материал упругого элемента		1, $b, d, r, s-u, y-\beta$
Давление среды		1, $b$
Натяжение каната		1, $y$

Здесь номинальные нагрузки  $P_x$  и  $P_y$  можно определить по формулам

$$P_x = 0,157 \frac{P_z}{\delta_z} = 0,157 C_z; \quad (4)$$

$$P_y = 0,24 \frac{P_z}{\delta_z} = 0,24 C_z, \quad (5)$$

где  $C_z$  — жесткость полукольца по вертикальной оси.

Для полукольца каната, расположенного под углом  $\alpha$  относительно вертикальной оси  $Z$ , величина деформации полукольца  $d_z$  при нагружении силой  $P_z$  (деформация сжатия) может быть определена по формуле [1]

$$\delta_{\alpha} = \frac{1,57 P_z R_B^3}{EJK_3} \sin \alpha. \quad (6)$$

Деформации по осям  $Y, Z$  определяем на основании формул (4) и (5)

$$\delta_{y\alpha} = \frac{P_y \delta_z \sin \alpha}{0,24 P_z}, \quad \delta_{x\alpha} = \frac{P_x \delta_z \sin \alpha}{0,155 P_z}. \quad (7)$$

Полученные эмпирические формулы (1)–(7) вполне можно использовать при разработках различных канатных виброизоляторов. Подтверждением этого служит и тот важный момент, что при сборке виброизолятора уточнять его характеристики можно за счет изменения диаметра кольца–витка (полукольца–полувитка) канатного упругого элемента. Для комбинированных (канатно-пружинных, канатных–плетенных, канатно-резиновых и др.) виброизоляторов возможности уточнения и получения заданных параметров еще больше. Это достигается, например, заменой дополнительного упругого элементов (пружин, резины и т. д.), особенностью их расположения (установки с зазором, натяжением, без зазора и т. п.), а также числа, формы упругого элемента и т. д.

При выборе и расчете виброизоляторов наряду с основными исходными данными обычно учитываются особенности окружающей среды, так как они могут эксплуатироваться в условиях экстремальных температур, при воздействии различных веществ, таких как топливо, масло, частицы соли, органические растворители.

Канатные и комбинированные виброизоляторы могут применяться практически во всех областях современной техники в судостроении, энергомашиностроении, автомобилестроении, авиации и космонавтики и других отраслях промышленности [1–10].

Основными исходными данными для решения проблемы сейсмо-, ударо-, вибро-, шумозащиты конкретного объекта могут быть (рис. 1, 2, табл. 2, 3):

- 1) частота собственных колебаний виброизолятора, Гц;
- 2) рабочий диапазон частот вращения объекта, об/мин;
- 3) масса объекта, кг;
- 4) номинальная нагрузка, Н;
- 5) длина, ширина, высота объекта, м;
- 6) вид виброизолятора (рис. 1, 2);
- 7) статические динамические жесткости (вертикальная, продольная, поперечная), Н/м;
- 8) размеры и форма виброизолятора, мм;
- 9) количество виброизоляторов;
- 10) сведения по материалу изготовления опорных и крепежных элементов, о работоспособности в агрессивных средах, о работе в различных климатических условиях, о диапазоне рабочих температур, о возможности регулирования характеристик, о сроках хранения, службы виброизолятора и т. п.

Однако в отдельных случаях заказчику достаточно представить исходные данные только по пунктам 1, 3, 8, 10 или 2, 3, 8, 9, 10.

Когда серийно выпускаемые виброизоляторы не удовлетворяют соответствующим требованиям сейсмо-, ударо-, вибро-, шумозащиты конкретного объекта, решение существующей проблемы может быть достигнуто использованием новых канатных и комбинированных виброизоляторов, работы над которыми ведутся непрерывно.

Однако следует учесть, что для широкого их внедрения существует множество преград, проблем и трудностей различного характера, над которыми работают многие специалисты. Положительные результаты предварительных испытаний [1] подтверждают целесообразность всесторонних исследований опытных образцов виброизоляторов, свойств стального каната, разработки и реализации высокоэффективных виброизолирующих опорных и неопорных конструкций и креплений технических средств. Особенности, основные

**Основные параметры канатных и комбинированных виброизоляторов, реализованных в системах виброзащиты различных объектов**

№ п/п	Номинальные статические нагрузки, Н			Жесткости, соответствующие деформациям в направлении осей, Н/м								
				статические			вибрационные			ударные		
	$P_z$	$P_x$	$P_y$	$C_z$	$C_x$	$C_y$	$C_z$	$C_x$	$C_y$	$C_z$	$C_x$	$C_y$
ТКВ-300 (1000)–D114–H43 (рис. 1, <i>p</i> ; 2, <i>c</i> )												
1	300–900	240–720	240–720	250 000–321 430	69 400–89 200	69 400–89 200	500 000–642 800	138 800–178 400	13 800–178 400	750 000–964 200	208 200–267 600	208 200–257 600
ТКВ-1000 (6000)–D210–H80 (рис. 1, <i>a, b, d, j</i> ; 2, <i>c</i> )												
2	1000–6000	1600–4800	1600–4800	1 330 000–1 430 000	380 000–360 000	38 000–360 000	2 660 000–2 860 000	760 000–720 000	760 000–720 000	3 990 000–4 290 000	1 140 000–1 080 000	1 140 000–1 080 000
ТКВ-2000 (7000)–D157–H90 (рис. 1, <i>a, b, d, j</i> ; 2, <i>c</i> )												
3	200–7000	1700–5900	1700–5900	2 424 240–2 187 500	607 140–590 000	607 140–590 000	4 848 480–4 375 000	1 214 280–1 180 000	1 214 280–1 180 000	7272780–6562500	1 821 420–1 770 000	1 821 420–1 770 000
ЦКВ-2000–L230–B102–H75 (рис. 1, <i>v-x</i> ; 2, <i>a, b</i> )												
4	2000	1700	700	52 631	212 500	77 778	1 052 632	425 000	156 000	1584211	1 349 281	494 242
ЦКРВ 1000 (3500)–L230–B102–H75 (рис. 1, <i>x</i> ; 2, <i>a, b</i> )												
5	1000–3500	850–3300	340–1320	833 333–105 000	283 300–412 500	68 000–132 000	1 666 660–210 000	566 000–825 000	136 000–264 000	2499000–3150000	849 900–1 237 500	204 000–396 000
ТКРВ-500 (1750)–D114–H43 (рис. 1, <i>β</i> ; 2, <i>c</i> )												
6	500–1750	450–1600	450–1600	1 000 000–1 400 000	277 778–388 880	277 778–388 880	2 000 000–2 800 000	555 556–777 778	555 556–777 778	3000000–4200000	833 330–1 166 667	833 330–1 166 667
ПКВ-500 (2000)–D97–H46 (рис. 1, <i>w</i> ; 2, <i>c</i> )												
7	500–2000	450–1700	450–1700	625 000–6 250 000	195 652–26 984 126	195 652–26 984 126	195 652–26 984 126	—	—	—	—	—
КРВ-100 (600) (рис. 1, <i>β</i> )												
8	100–600	50–250	50–250	—	—	—	—	—	—	—	—	—

характеристики и области применения известных канатных и комбинированных виброизоляторов (см. рис. 1) представлены в работах [1–7, 9].

Разработанные виброизоляторы защищены патентами РФ, экспонировались на городских и международных салонах («НЕВА», «ТРАНСТЕК», «МОРСКОЙ САЛОН», «ИЗДЕЛИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ДВОЙНОГО НАЗНАЧЕНИЯ», «АРХИМЕД» и др.). Экспонаты неоднократно оценивались дипломами, а на Московском Международном салоне промышленной собственности «АРХИМЕД» — пятью золотыми и десятью серебряными медалями.

#### Литература

1. *Минасян М.А.* Развитие и совершенствование методов снижения виброактивности корабельных дизельных энергетических установок. — СПб.: ВМА, 2006.
2. *Минасян М.А.* Разработка виброизолирующих конструкций и креплений корабельных технических средств в ВМА им. Кузнецова Н.Г. — СПб.: ВМА, 2007.
3. *Минасян М.А.* Виброизолирующие конструкции и крепления корабельных технических средств. Оборонный заказ 2007., № 12.

4. *Минасян М.А.* Опыт практического использования спирального тросового виброизолятора в судовых условиях // Двигателестроение. — 1996. — № 2.

5. *Минасян М.А.* Виброизоляция дизель-генератора ДГА 50-9, смонтированного на спиральных тросовых виброизоляторах типа СТВ-220 // Двигателестроение. — 1997. — № 3. — С. 19–21.

6. *Минасян М. А.* Эффективность вибрационной защиты судовых дизель-генераторных агрегатов, смонтированных на спиральных тросовых виброизоляторах // Двигателестроение. — 2000. — № 4. — С. 11–14.

7. *Минасян М. А.* Амортизация судовых механизмов, приборов и аппаратуры тросовыми и комбинированными виброизоляторами // Судостроение. — 2004. — № 1. С. 39–43.

8. *Минасян А.М.* Комбинированный виброизолятор. Материалы V НТК молодых инженеров и экономистов «ВЗГЛЯД В БУДУЩЕЕ». — СПб.: ФГУП ЦКБ МТ «Рубин», 25–26 октября 2007 г. С. 283–297.

9. Судовые энергетические установки. Судовые дизельные энергетические установки: учебник / В.К. Румб, Г.В. Яковлев, Г.И. Шаров, В.В. Медведев, М.А. Минасян. — СПб.: СПбГМТУ, 2007. — 622 с.

10. *Минасян М. А., Минасян А.М.* Спиральные тросовые и комбинированные виброизоляторы. — В каталогах: V–XI Московских Международных салонов промышленной собственности «Архимед–2001–2008».