

УДК 534.6+62-752+62-419
EDN: XDLXTX

В.Ю. Кирпичников¹, В.В. Савенко¹, А.И. Сятковский²

¹ ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

² ОАО «Пластполимер», Санкт-Петербург, Россия

ВЛИЯНИЕ МАССОВЫХ ПАРАМЕТРОВ АРМИРОВАННОГО ВИБРОПОГЛОЩАЮЩЕГО ПОКРЫТИЯ НА ЕГО ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Объект и цель научной работы. Объектом является армированное вибропоглощающее покрытие, содержащее тонкий слой полимерной пленки на основе поливинилацетата и армирующий слой различной толщины из алюминия и стали. Цель исследования – анализ зависимости эффективности покрытия от его массовых параметров.

Материалы и методы. Измерения спектров вибрации пластин при отсутствии и наличии покрытия.

Основные результаты. Получены зависимости эффективности покрытия от его относительной массы и отношения массы армирующего слоя к массе полимерной пленки.

Заключение. Показано, что полученные результаты могут быть использованы при выполнении работ по уменьшению уровней вибрации и шумоизлучения функционально различных инженерных конструкций.

Ключевые слова: армированное вибропоглощающее покрытие, полимерная пленка, массовые параметры, эффективность.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

UDC 534.6+62-752+62-419
EDN: XDLXTX

V.Yu. Kirpichnikov¹, V.V. Savenko¹, A.I. Syatkovskiy²

¹ Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

² JSC Plastpolymer, St. Petersburg, Russia

WEIGHT VS EFFICIENCY OF REINFORCED ANTI-VIBRATION COATING

Object and purpose of research. This paper discusses reinforced anti-vibration coating with a thin layer of polymeric (PVA) film and reinforcing layer (aluminium and steel) of different thickness. The purpose of the study was to analyze how coating efficiency changes with its weight.

Materials and methods. Vibration spectra measurements on plates with and without coating.

Main results. The study has shown how coating efficiency depends on its relative weight, as well as on weight ratio between the reinforcing layer and the polymer film.

Conclusion. It is shown that this study could be helpful for noise and vibration mitigation efforts with respect to engineering structures of various purpose.

Keywords: reinforced anti-vibration coating, polymeric film, weight parameters, efficiency.

The authors declare no conflicts of interest.

Уменьшение уровней вибрации и шумоизлучения корпусных и внутрикорпусных конструкций различного рода сооружений, транспортных средств, оборудования и приборов является одним из основ-

ных направлений работ по улучшению их эксплуатационных характеристик, а также по созданию комфортных условий для обслуживающего персонала и пассажиров.

Для цитирования: Кирпичников В.Ю., Савенко В.В., Сятковский А.И. Влияние массовых параметров армированного вибропоглощающего покрытия на его эффективность. Труды Крыловского государственного научного центра. 2024; 1(407): 100–106.

For citations: Kirpichnikov V.Yu., Savenko V.V., Syatkovskiy A.I. Weight vs efficiency of reinforced anti-vibration coating. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2024; 1(407): 100–106 (in Russian).

Решение соответствующей задачи выполняется во многих случаях вибродемпфированием конструкций путем облицовки их элементов вибропоглощающими покрытиями (ВПП). Используют, в частности, мягкие, жесткие и армированные ВПП. Описание и физические основы работоспособности ВПП, а также информация о свойствах используемых при их изготовлении вибропоглощающих материалов содержатся, например, в работах [1–3].

В последние годы наиболее широко применяются находят армированные ВПП, состоящие из диссипативного слоя вязкоупругого материала и жесткого армирующего слоя. При использовании вязкоупругих материалов с небольшими потерями колебательной энергии (например, резин) эффективность армированных вибропоглощающих покрытий (АВП), особенно на низших резонансных частотах демпфируемых конструкций, оказывается малой даже при их относительно большой массе, составляющей до 40–50 % массы конструкций.

С учетом изложенного особую актуальность приобретают исследования по разработке АВП, имеющих малую массу и высокую эффективность в широком диапазоне частот, начиная с низших резонансных частот демпфируемых конструкций.

В силу значительно меньшей плотности материалов вязкоупругого слоя в сравнении с плотностью традиционно применяемых металлических материалов армирующего слоя очевидными направлениями работ по уменьшению массы АВП являются уменьшение толщины, прежде всего, металлического армирующего слоя и/или изготовление его из жестких материалов, имеющих меньшую плотность, чем металлы.

Основной путь одновременного, с уменьшением массы АВП, увеличения их эффективности – использование в качестве диссипативного слоя материалов с большим вибропоглощением. Одним из таких материалов является поливинилацетат, имеющий коэффициент потерь η колебательной энергии в пределах от 1 до 3 в интервале рабочих температур наибольшего вибропоглощения. Согласно работе [4] столь высокие значения η материал имеет в диапазоне частот от 1 Гц до 10 кГц. Модуль упругости поливинилацетата имеет порядок 0,1–10 МПа, а его плотность равна ~ 1200 кг/м³.

На основе поливинилацетата изготавливается полимерная пленка, совокупность марок которой имеет приведенные выше значения коэффициента потерь в интервале температур от -5 до $+100$ °С. Однако ширина диапазона температур наибольшего вибропоглощения каждой марки полимерной плен-

ки равняется примерно 20 °С. Толщина полимерных пленок составляет 0,2–1,5 мм [4].

Вибропоглощающие свойства пленки в составе АВП реализуются за счет влияния вязкости на поле скоростей ее частиц при их виброперемещениях колебательными процессами в демпфируемой конструкции и тормозящем действии жесткого армирующего слоя. По своим физическим свойствам пленка близка к слою вязкой жидкости. Можно ожидать, что наибольшее влияние ее вязкости проявляется в очень тонком, приграничном к поверхности демпфируемой конструкции слое [5], а из-за тормозящего действия жесткого армирующего слоя ВПП потери колебательной энергии в полимерной пленке возрастают с уменьшением ее толщины [6].

На основании полученных в работах [5, 6] теоретических выводов сделано предположение о возможности уменьшения толщины полимерной пленки в составе АВП без существенной потери его эффективности.

Правильность предположения подтвердили результаты выполненных экспериментальных исследований по определению эффективности покрытий с полимерной пленкой толщиной 0,2; 0,5 и 1,5 мм и стальным армирующим листом толщиной 0,6 мм [7]. Покрытия устанавливались на стальные пластины с размерами $1 \times 0,75 \times 4 \cdot 10^{-3}$ м.

Результаты экспериментального исследования влияния толщины армирующего слоя покрытия на его эффективность содержатся в работе [8]. Толщина (0,5 мм) и марка (ВПС-2,5) полимерной пленки в составе испытанных вариантов АВП с разной толщиной армирующего слоя были одинаковыми. В связи с этим анализ влияния массовых параметров покрытия на его эффективность носил ограниченный характер. Приведенных в указанных работах данных для оценки допустимой минимизации массы, следовательно, и стоимости АВП, обладающего требуемой эффективностью, было недостаточно.

Целью настоящей работы является исследование влияния массовых параметров рассматриваемого типа АВП с полимерной пленкой на его эффективность с использованием результатов как ранее проведенных, так и новых испытаний. Под массовыми параметрами покрытия далее подразумеваются его относительная масса $\mu = M/M_{пл}$ (M и $M_{пл}$ – массы покрытия и демпфируемой пластины соответственно) и отношение μ_1 массы армирующего слоя к массе полимерной пленки. Оба параметра оказывают определяющее влияние и на эффективность покрытия, и на его стоимость.

Основой выполненного исследования являются результаты вибрационных испытаний двадцати одного варианта покрытия (АВП1–АВП21). Испытания всех покрытий выполнялись с использованием последовательно закрепляемых на монтажной рамке демпфируемых пластин из стали с размерами в плане 0,52×0,38 м. Толщина пластин, с использованием которых испытывались варианты покрытия АВП1–АВП20, равнялась 3 мм. Вариант АВП21 испытывался на пластине толщиной 1,5 мм. Обе пластины являются типичным наиболее вибровозбудимым и звукоизлучающим элементом инженерных конструкций, расположенным между соседними подкреплениями.

Все испытанные варианты АВП устанавливались на одну из поверхностей демпфируемой пластины. Площадь АВП, испытанных с использованием пластин толщиной 3 мм, составляла 60 % площади демпфируемой пластины. Пластина толщиной 1,5 мм испытывалась при ее полной облицовке покрытием.

В качестве армирующего слоя покрытия использовалась алюминиевая фольга, а также листы алюминия или стали различной толщины. Диссипативным слоем большинства АВП являлась полимерная пленка марки ВПС-2,5 толщиной 0,5 мм с температурным диапазоном от +10 до +30 °С повышенных ($\eta > 1$) значений коэффициента потерь. Испытания соответствующих покрытий выполнялись при комнатной температуре. Два покрытия содержали полимерные пленки марок ВПНС-1 и ВПНС-4 и испытывались при температурах +40 и –2 °С соответственно, находящихся в диапазонах температур их наибольшей работоспособности. Три покрытия содержали одинаковые по площади участки полимерной пленки марок ВПС-2,5, ВПНС-1 и ВПНС-4 и отличались друг от друга

лишь схемой расположения этих участков на демпфируемой пластине [9]. Испытания этих покрытий проводились при температурах –2, +20 и +40 °С соответственно. Установлена практическая независимость их эффективности от температуры.

В ходе выполненных испытаний измерялись уровни входной вибровозбудимости демпфируемой пластины при отсутствии и наличии армированного вибропоглощающего покрытия. Возбуждение пластины производилось многократными ударами миниатюрным вибромолотком с датчиком силы по ее необлицованной поверхности. Каждое покрытие испытывалось при последовательном возбуждении пластины в четырех точках, три из которых находились в пучностях низших форм изгибных колебаний пластины, а четвертая – на одинаковых расстояниях от ее геометрического центра и одного из углов.

Под входной вибровозбудимостью понимаются нормированные возбуждающей силой F уровни виброускорения A пластины в точках, находящихся в непосредственной близости от точек ее возбуждения. Входная вибровозбудимость A/F измерялась в децибелах относительно порогового уровня виброускорения $A_0 = 10^{-6}$ м/с² ($A/F = 20 \lg(A F_0 / (A_0 F))$), где $F_0 = 1$ Н).

Под эффективностью покрытия далее понимается уменьшение уровней входной вибровозбудимости демпфируемой пластины после нанесения на нее покрытия. Измерения выполнялись в широком частотном диапазоне 0–6400 Гц. Основное внимание в дальнейшем уделено диапазону 0–1600 Гц, содержащему низшие резонансные частоты изгибных колебаний демпфируемых пластин, в котором эффективность применяемых вибропоглощающих покрытий из резины обычно невысока и, как правило, не превышает 6–10 дБ.

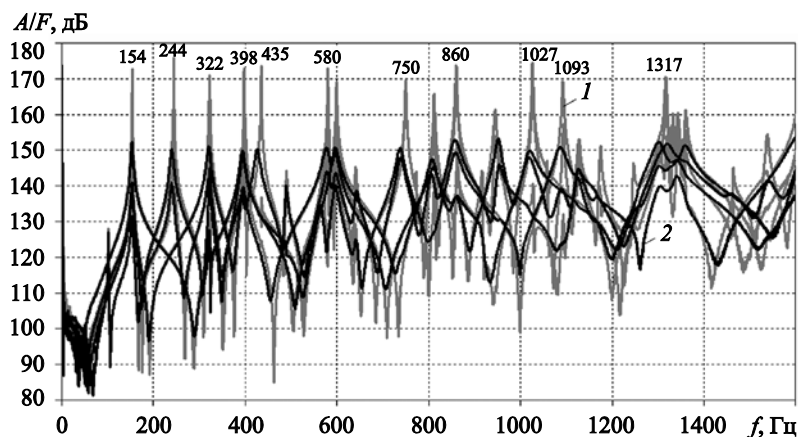


Рис. 1. Узкополосные спектры входной вибровозбудимости пластины при отсутствии (1) и наличии (2) АВП5

Fig. 1. Narrow-band spectra for input vibration excitability of the plate without (1) and with (2) anti-vibration coating (AVP-5)

На рис. 1 изображены типичные узкополосные ($\Delta f = 1$ Гц) спектры входной вибровозбудимости одной из пластин толщиной 3 мм в отсутствие и при наличии одного из вариантов АВП. Приведенные и использованные в дальнейшем анализе спектры A/F в диапазоне 0–1600 Гц измерены в точках, находящихся в зонах пучностей форм изгибных колебаний четырех низших резонансных частот демпфируемой пластины. В качестве эффективности \mathcal{E} , дБ, испытанных вариантов АВП используются ее значения, усредненные по указанным точкам измерения, а также по наибольшему резонансным максимумам в спектрах входной вибровозбудимости пластин.

В таблице приведена следующая информация о вариантах испытанных покрытий:

- толщина h , мм, армирующего и диссипативного слоев АВП;

- материал армирующего слоя покрытий (Ал – алюминий, Ст – сталь);
- марка полимерной пленки (1 – ВПС-2,5, 2 – ВПНС-1, 3 – ВПНС-4) в составе покрытий;
- относительные массовые параметры μ и μ_1 покрытий;
- эффективность \mathcal{E} , дБ, покрытий.

В таблицу включены лишь результаты испытаний с одинаковой технологией изготовления и установки АВП на демпфируемую пластину. Самоклеящуюся полимерную пленку наносили сначала на очищенную ацетоном поверхность армирующего слоя. Затем приклеивали другую поверхность пленки к таким же образом обработанной поверхности пластин. При использовании одной и той же пластины толщиной 3 мм для испытаний нескольких вариантов АВП второй и последующие варианты наносились после демонтажа предыдущего

Таблица. Сведения о вариантах армированного вибропоглощающего покрытия и его эффективности

Table. Configurations and efficiencies of reinforced anti-vibration coating

№ АВП	Армирующий слой		Диссипативный слой		μ , %	μ_1	\mathcal{E} , дБ
	h , мм	материал	h , мм	марка			
1	0,01	Ал	0,5	1	1,6	0,045	0
2	0,1	Ал	0,5	1	2,2	0,45	17
3	0,2	Ал	0,5	1	2,9	0,90	19
4	0,3	Ал	0,5	1	3,6	1,35	21
5	0,12	Ст	0,5	1	3,9	1,55	21
6	0,24	Ст	0,5	1	6,3	3,12	26
7	0,6	Ст	0,5	1	13,5	7,79	33
8	1,5	Ст	0,5	1	30	19,5	34
9	3,0	Ст	0,5	1	62	38,9	35
10	0,5	Ст	0,5	1	11,5	6,5	32
11	0,5	Ст	0,5	2	11,5	6,5	31
12	0,5	Ст	0,5	3	11,5	6,5	31
13	0,5	Ст	0,5	1, 2, 3	11,5	6,5	31
14	0,5	Ст	0,5	1, 2, 3	11,5	6,5	31
15	0,5	Ст	0,5	1, 2, 3	11,5	6,5	31
16	1,0	Ал	0,5	1	8,5	4,5	30
17	0,1	Ал	0,5	1	2,2	0,45	14
18	0,2	Ал	0,5	1	2,9	0,90	17
19	0,3	Ал	0,5	1	3,6	1,35	18
20	0,1	Ал	0,25	1	1,5	0,91	4
21	0,5	Ст	0,5	1	39	6,5	32

и полной очистки поверхности демпфируемой пластины от остатков пленки.

Содержащиеся в таблице одинаковые по массовым параметрам покрытия (АВП2 и АВП17, АВП3 и АВП18, АВП4 и АВП19) изготавливались и испытывались в разное время с промежуточным интервалом до нескольких лет. Мало отличающиеся результаты их испытаний подтверждают стабильность диссипативных характеристик полимерных пленок и приведенных значений эффективности покрытий.

Обращаясь к таблице, видим, что значительный рост эффективности АВП зарегистрирован при увеличении относительной массы μ от значений 1,5–1,6 % у покрытий АВП1 и АВП20 до значения 2,2 % у покрытий АВП2 и АВП17 с одинаковой величиной (0,45) отношения μ_1 массы армирующего слоя к массе полимерной пленки. Повышение эффективности АВП от 0–4 дБ до 14–17 дБ обусловлено существенным увеличением массы армирующего слоя покрытия до ее значения, при котором она составляет примерно половину массы диссипативного слоя.

При массе 0,0032 кг ($\mu_1 = 0,045$) алюминиевой фольги толщиной 0,01 мм (АВП1), меньшей в ~23 раза массы полимерной пленки, влияние армирующего слоя на колебательный процесс в пленке практически отсутствует. Пленка, на которой находится алюминиевая фольга с существенно меньшей, чем у нее, массой, колеблется при этом с высокой вероятностью так же, как и при отсутствии фольги. Увеличение массы фольги на порядок (АВП2 и АВП17) усиливает ее действие на полимерную пленку и приводит к значительному росту эффективности указанных АВП.

О принципиальном влиянии массы армирующего слоя на эффективность АВП свидетельствует и ее повышение до 4 дБ при увеличении коэффициента μ_1 от значения 0,045 у покрытия АВП1 до значения 0,91 у покрытия АВП20 при практически одинаковой величине относительной массы μ этих покрытий.

В диапазоне значений μ_1 от 0,45 до 1,55, в котором величина масс слоев покрытия отличается не более чем в 2,2 раза, его эффективность с ростом μ_1

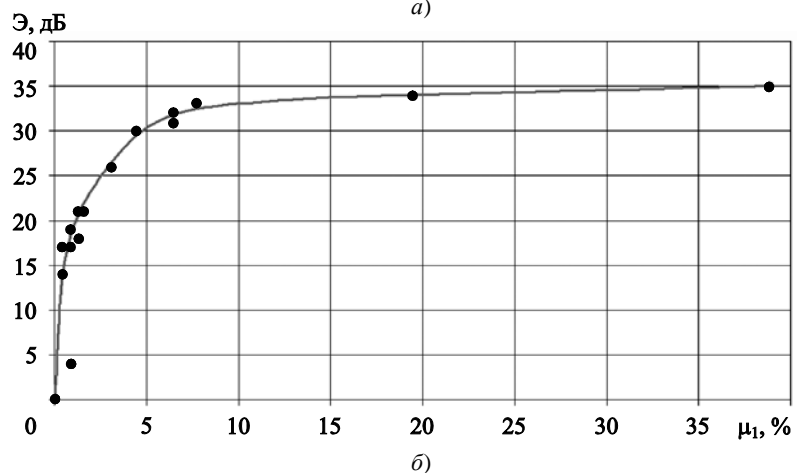
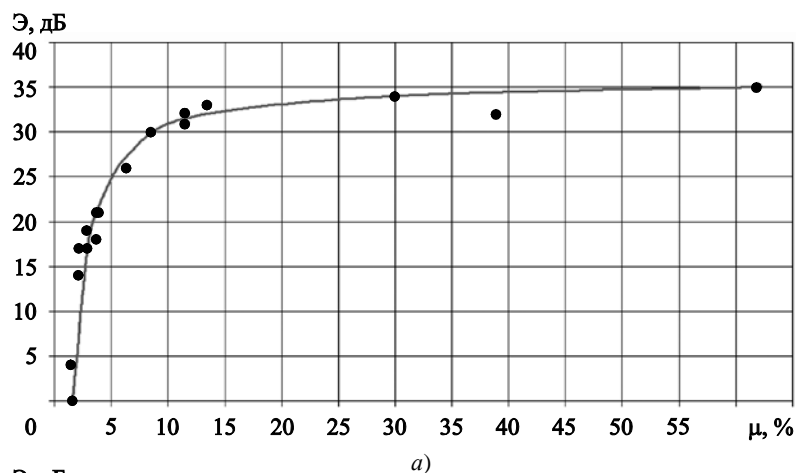


Рис. 2. Зависимость эффективности армированного вибропоглощающего покрытия от его относительной массы μ (а) и отношения μ_1 (б) массы армирующего слоя к массе полимерной пленки

Fig. 2. Efficiency of reinforced anti-vibration coating as function of its relative weight μ (a) and weight ratio μ_1 (b) of the reinforcing layer and the polymeric film

изменяется не столь заметно. Эффективность покрытий АВП2–АВП5 и АВП17–АВП19 отличается от ее среднего арифметического значения 19 дБ не более чем на 2 дБ. Наибольшая величина относительной массы указанных вариантов покрытия равняется 3,9 %, а масса армирующего слоя превосходит массу полимерной пленки не более чем в 1,55 раза.

При каждом, примерно двукратном, дальнейшем увеличении массы армирующего слоя в диапазоне значений коэффициента μ_1 от 1,55 до 6,5 эффективность покрытия повышается на 5–6 дБ. Например, значения эффективности покрытий АВП5, АВП6 и АВП10–АВП15 с толщиной стального листа 0,12; 0,24 и 0,5 мм равняются 21, 26 и 31–32 дБ соответственно. Относительная масса μ указанных вариантов АВП изменяется в диапазоне значений от 3,9 % (АВП5) до 11,5 % (АВП10–АВП15).

При увеличении массы армирующего слоя в сравнении с массой полимерной пленки более чем в 6,5 раза эффективность АВП практически не повышается. Так, эффективность АВП9 со значениями $\mu = 62$ % и $\mu_1 = 38,9$ превышает эффективность АВП10, имеющего $\mu = 11,5$ % и $\mu_1 = 6,5$, всего на 3 дБ и составляет 35 дБ.

С учетом изложенного можно сделать вывод о различном влиянии массовых параметров рассмотренного типа АВП на его эффективность в следующих диапазонах значений μ и μ_1 (рис. 2):

- с нулевой или малой величиной эффективности при значениях $\mu \leq 1,6$ %; при практически одинаковом значении $\mu \approx 1,6$ % (АВП1) и $\mu \approx 1,5$ % (АВП20) большую эффективность имеет вариант АВП20 с меньшей толщиной диссипативного слоя и большим значением μ_1 ;
- с интенсивным ростом эффективности при увеличении μ от значения 1,6 % до значения 2,2 %;
- с малым ростом эффективности при увеличении μ от значения 2,2 % до значения 3,9 %;
- с повышением эффективности на 5–6 дБ при каждом почти двукратном увеличении массы армирующего слоя ($1,55 \leq \mu_1 \leq 6,5$) в сравнении с массой пленки в диапазоне значений $3,9 \% \leq \mu \leq 11,5 \%$, достигая эффективности около 30 дБ;
- со значениями $\mu > 11,5$ % и $\mu_1 > 6,5$, при которых повышение эффективности АВП с ростом значений его относительных параметров практически не наблюдается и составляет не более 35 дБ.

Приведенные результаты могут быть использованы при выполнении работ по уменьшению уровней вибрации и шумоизлучения функционально различных инженерных конструкций.

Список использованной литературы

1. *Никифоров А.С.* Акустическое проектирование судовых конструкций. Ленинград : Судостроение, 1990. 198, [1] с.
2. *Ионов А.В.* Средства снижения вибрации и шума на судах. Санкт-Петербург : ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2000. 349 с.
3. Эластомерные материалы в средствах снижения вибрации и шума на судах / *А.В. Ионов, Л.Е. Бувайло, М.В. Волкова, А.П. Старостин* // Российский химический журнал. 2009. Т. 53, № 4. С. 41–53.
4. *Алексеев С.А., Сятковский А.И.* Вибродемпфирующие свойства полимерных пленок // Судостроение. 2015. № 6. С. 45–46.
5. *Кирпичников В.Ю.* Об учете вязкости в жидкой среде, возмущенной поперечными колебаниями ограничивающей плоской поверхности // Прикладная механика / Отд. математики, механики и кибернетики АН УССР. 1969. Т. 5, вып. 5. С. 102–106.
6. *Кирпичников В.Ю., Петров А.А.* О потерях в вязком несжимаемом слое с колеблющейся и жесткой границами // Труды Крыловского государственного научного центра. 2020. Вып. 1(391). С. 175–179. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-1-391-175-179.
7. *Кирпичников В.Ю.* Вред и польза резонансных явлений в элементах судовых конструкций. Санкт-Петербург : Крыловский государственный научный центр, 2019. 176 с.
8. *Кирпичников В.Ю., Коцеев А.П., Сятковский А.И.* Исследования эффективности металл-полимерных вибропоглощающих покрытий с тонким армирующим слоем // Прикладная механика и техническая физика. 2020. Т. 61, вып. 6. С. 70–74. DOI: 10.15372/PMTF20200609.
9. Экспериментальные исследования эффективности армированного вибропоглощающего покрытия на основе пленок из поливинилацетата с различными рабочими диапазонами температур / *В.Ю. Кирпичников, И.В. Грушецкий, А.И. Сятковский, Л.Ф. Дроздова* // Защита от повышенного шума и вибрации : Сборник докладов VII Всероссийской научно-практической конференции. Санкт-Петербург : Ин-т акустических конструкций, 2019. С. 39–45.

References

1. *Nikiforov A.* Acoustic design of ship structures. Leningrad : Sudostroyeniye, 1990. 198 p. (*in Russian*).
2. *Ionov A.* Noise and vibration damping tools for ships. St. Petersburg : Krylov Central Research Institute, 2000. 349 p. (*in Russian*).
3. Elastomeric materials in noise and vibration damping aboard ships / *A. Ionov, L. Buvailo, M. Volkova,*

- A. Starostin // Russian Chemistry Journal. 2009. Vol. 53, No. 4. P. 41–53 (*in Russian*).
4. Alexeev S., Syatkovsky A. Damping parameters of polymeric films // Sudostroyenie. 2015. No. 6. P. 45–46 (*in Russian*).
 5. Kirpichnikov V. On consideration of viscosity in fluid medium disturbed by transverse vibration of limiting flat surface // International Applied Mechanics. 1969. Vol. 5, No. 5. P. 102–106 (*in Russian*).
 6. Kirpichnikov V., Petrov A. On energy losses in viscous incompressible layer with fluctuating and stiff boundaries // Transactions of Krylov State Research Centre. 2020. Vol. 1(391). P. 175–179. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-1-391-175–179 (*in Russian*).
 7. Kirpichnikov V. Structural resonances aboard ship: pros and cons. St. Petersburg : Krylov State Research Centre, 2019. 174 p. (*in Russian*).
 8. Kirpichnikov V., Koscheev A., Syatkovsky A. Efficiency of metal-polymer anti-vibration coatings with thin constraining layer // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2020. Vol. 61, No. 6. P. 70–74. DOI: 10.15372/PMTF20200609 (*in Russian*).
 9. Efficiency of reinforced anti-vibration coatings based on PVA films with different operational ranges of temperatures / V. Kirpichnikov, I. Grushetsky, A. Syatkovsky, L. Drozdova // Compendium of papers, VII All-Russian Research and Practice Conference “Protection against Excessive Noise and Vibration”. St. Petersburg : Institute of Acoustic Structures, 2019. P. 39–45 (*in Russian*).

Сведения об авторах

Кирпичников Валерий Юлианович, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-48-01. E-mail: sotnik26@bk.ru.

Савенко Валентин Викторович, к.т.н., ведущий научный сотрудник, заместитель начальника лаборатории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-49-85.

Сятковский Александр Иорданович, к.х.н., директор по науке ОАО «Пластполимер». Адрес: 195197, Россия, Санкт-Петербург, Полюстровский пр., д. 32. Тел.: +7 (812) 540-89-90.

About the authors

Valery Yu. Kirpichnikov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-48-01. E-mail: sotnik26@bk.ru.

Valentin V. Savenko, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Head of Laboratory – Lead Researcher, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-49-85.

Aleksandr I. Syatkovskiy, Cand. Sci. (Chem.), Director on Science, JSC Plastpolymer. Address: 32, Polyustrovskiy Prospect, St. Petersburg, Russia, post code 195197. Tel.: +7 (812) 540-89-90.

Поступила / Received: 28.09.23

Принята в печать / Accepted: 05.03.24

© Кирпичников В.Ю., Савенко В.В., Сятковский А.И., 2024