

УДК 621.646.9-752
EDN: ONWRPF

М.В. Куклин
АО «ПО «Севмаш»», Северодвинск, Россия

ПРИМЕНЕНИЕ ТОНКОСЛОЙНЫХ РЕЗИНОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ДИССИПАТИВНЫХ СВОЙСТВ ВИБРОИЗОЛИРУЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

Объект и цель научной работы. Объектом исследования являются переборочные уплотнения (ПУ) на основе сильфонных металлических компенсаторов с тонкослойными резинометаллическими элементами (ТРМЭ) и без них. Цель работы – оценка влияния ТРМЭ на статические, динамические характеристики и виброизолирующую эффективность ПУ.

Материалы и методы. Исследования переборочных уплотнений базируются на использовании результатов экспериментальных испытаний.

Основные результаты. Установка ТРМЭ в состав переборочного уплотнения приводит к улучшению диссипативных свойств, что увеличивает виброизолирующую эффективность ПУ.

Заключение. Показано, что переборочное уплотнение на основе сильфонного компенсатора с ТРМЭ является перспективным средством акустической защиты, которое целесообразно применять разработчикам виброактивных трубопроводных систем для обеспечения необходимых требований по уровням вибрации.

Ключевые слова: переборочное уплотнение, сильфонный компенсатор, тонкослойный резинометаллический элемент, виброизолирующая эффективность.

Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.

UDC 621.646.9-752
EDN: ONWRPF

M.V. Kuklin
JSC PO Sevmash, Severodvinsk, Russia

APPLICATION OF THIN RUBBER-METAL ELEMENTS FOR IMPROVING DISSIPATIVE PROPERTIES OF VIBRATION ISOLATION STRUCTURES

Object and purpose of research. The object of this study is bulkhead seals (BS) based on metal bellows with thin-layer rubber-metal elements (TRME) and without the same. The purpose is to estimate how TRME influence on static and dynamic characteristics and vibration isolation efficiency of BS.

Materials and methods. Studies of the bulkhead seals are based on the experimental test data.

Main results. TRME in the bulkhead seals improves dissipative properties and increase BS vibration isolation efficiency

Conclusion. It is shown that bulkhead seals based on bellows with TRME are promising tools of acoustic protection, which are advised for application to meet vibration level requirements.

Keywords: bulkhead seal, bellows, thin-layer rubber-metal element, vibration isolation efficiency.

The author declares no conflicts of interest.

Для цитирования: Куклин М.В. Применение тонкослойных резинометаллических элементов для улучшения диссипативных свойств виброизолирующих конструкций. Труды Крыловского государственного научного центра. 2026; 1(415): 185–192.

For citations: Kuklin M.V. Application of thin rubber-metal elements for improving dissipative properties of vibration isolation structures. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2026; 1(415): 185–192 (in Russian).

Введение

Introduction

Из всех применяемых методов и средств снижения вибрации оборудования, механизмов и трубопроводов на первом месте по эффективности находятся средства виброизоляции. Поэтому улучшение виброакустических характеристик виброизолирующих конструкций остается одной из самых актуальных задач.

В настоящее время для виброизоляции и герметизации мест прохода судовых трубопроводов через непроницаемые переборки и настилы применяются сильфонные переборочные уплотнения на основе металлических компенсаторов и сильфонов по ГОСТ 27036-86.

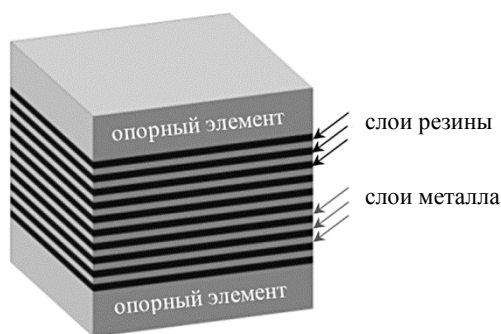


Рис. 1. Конструктивное исполнение тонкослойного резинометаллического элемента

Fig. 1. Design configuration of thin-layer rubber-metal element

Для улучшения диссипативных свойств сильфонного ПУ предлагается присоединить к нему резинометаллический виброизолятор – тонкослойный резинометаллический элемент [1]. ТРМЭ представляет собой гибкую неразъемную вставку, состоящую из набора прочно скрепленных между собой тонких чередующихся слоев резины и металла, к которой привулканизированы металлические опорные элементы (рис. 1).

Характерными особенностями ТРМЭ являются низкая жесткость в поперечном направлении при сдвиге вдоль слоев резины и достаточно высокая жесткость в осевом направлении при сжатии слоев [2]. Варьируя толщину резинового слоя, можно изменять сдвиговую жесткость и жесткость на сжатие. Стоит отметить, что при эксплуатации ТРМЭ не допускается действие на него растягивающего усилия, поэтому ТРМЭ должен находиться в поджатом состоянии.

Предлагаемая перспективная конструкция виброизолирующего ПУ, представляющего собой сильфонный металлический компенсатор с последовательно присоединенными к нему ТРМЭ, представлена на рис. 2. Виброизоляция в данной конструкции в радиальных направлениях обеспечивается за счет двух ТРМЭ, установленных по оппозиционной схеме, а в осевом направлении осуществляется переборочным сильфонным хомутовым уплотнением.

Вибрационные испытания макета переборочно-уплотнения на основе тонкослойных резинометаллических элементов, изготовленных собственными силами, показали, что ПУ на основе силь-

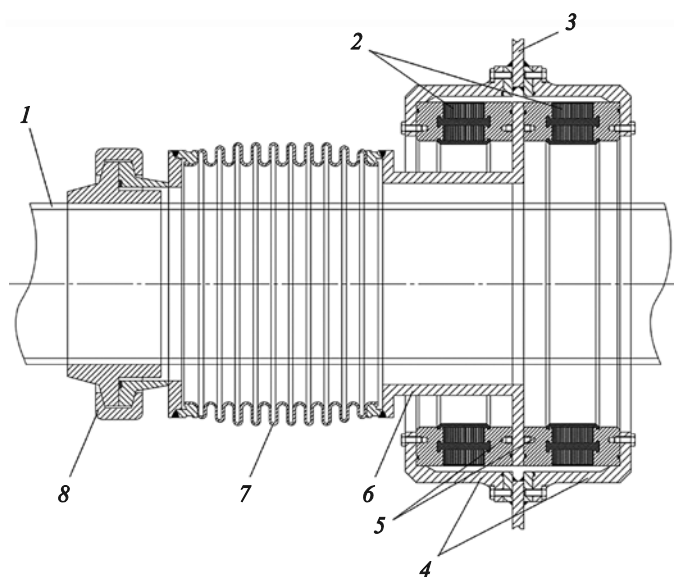


Рис. 2. Виброизолирующее переборочное уплотнение: 1 – трубопровод; 2 – кольцевые тонкослойные резинометаллические элементы; 3 – межотсечная переборка; 4 – корпуса крепления к переборке; 5 – направляющие штифты; 6 – стыковочная труба; 7 – переборочное сильфонное хомутовое уплотнение; 8 – хомут

Fig. 2. Vibration isolation seal: 1 – pipeline; 2 – circular thin-layer rubber-metal elements; 3 – between-compartment bulkhead; 4 – bulkhead connections; 5 – guide pins; 6 – tie-in pipe; 7 – bulkhead bellow seal; 8 – yoke

Рис 3. Test setup for bulkhead seal assemblies:
1 – bellows; 2 – adaptor;
3 – thin-layer rubber-element; 4 – vertical body of RC foundation;
5 – bedplate of horizontal RC foundation;
6 – strut;
7 – low-frequency suspension;
8 – electrodynamic shaker

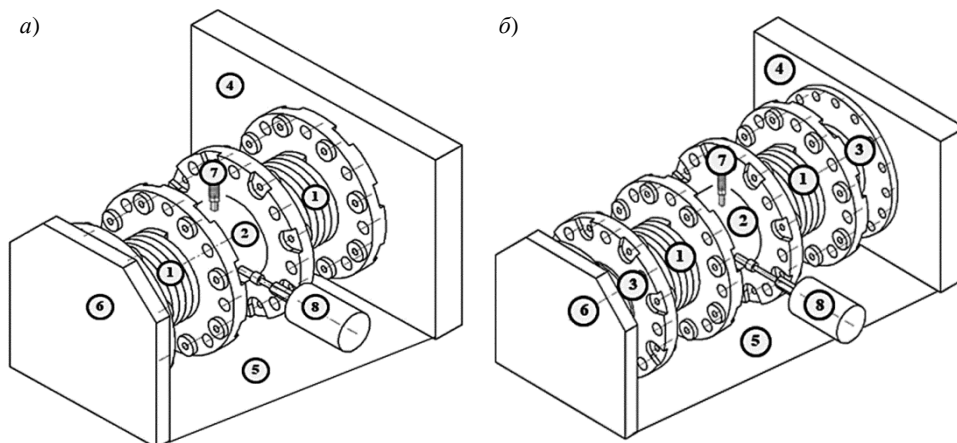


Рис 3. Схемы испытаний сборок переборочного уплотнения: а) сборка «2СК»; б) сборка «2СК + 2ТРМЭ». 1 – сильфонный компенсатор; 2 – переходник; 3 – тонкослойный резинометаллический элемент; 4 – вертикальный массив железобетонного фундамента; 5 – монтажная плита горизонтального массива железобетонного фундамента; 6 – кронштейн; 7 – низкочастотный подвес; 8 – электродинамический вибратор

фонного компенсатора с ТРМЭ превосходят по виброизолирующей эффективности сильфонный компенсатор [3].

С целью более качественной оценки влияния ТРМЭ на улучшение диссипативных свойств переборочного уплотнения разработаны экспериментальные образцы ПУ на основе изделий, выпускаемых отечественной промышленностью, изготавливаемых и поставляемых по техническим условиям.

На стенде испытывались две сборки переборочных уплотнений:

- сборка «2СК», сформированная из двух сильфонных металлических компенсаторов (СК) Ду200 (черт. № НИЯП.302667.003, исполнение 15 с демонтированными шпильками разгрузочной арматуры), соединенных входными фланцами через переходник (рис. 3а);

- сборка «2СК+2ТРМЭ», сформированная из сборки «2СК», в которой выходные фланцы СК последовательно соединены с ТРМЭ Ду250 (черт. ТРМЭ.0004-000СБ) (рис. 3б).

При проведении испытаний поджатие сборок ПУ осуществлялось с помощью подвижного кронштейна 6, жестко соединяемого с монтажной плитой 5 (рис. 3).

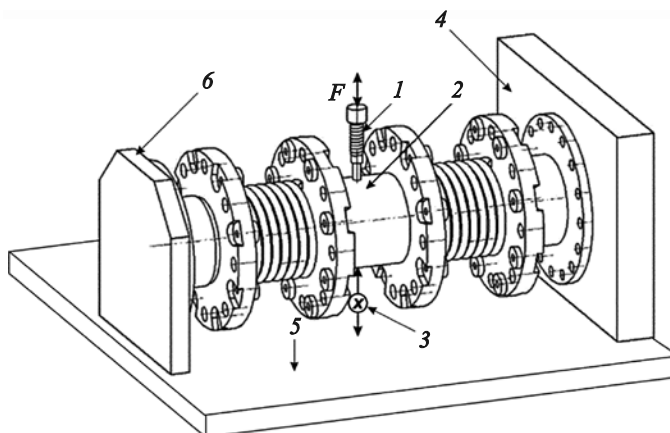
Определение статической жесткости переборочных уплотнений

Determination of BS static stiffness

Для каждой сборки ПУ определялись статические жесткости в вертикальном направлении по схеме, изображенной на рис. 4. В процессе испытаний

Рис. 4. Схема испытаний по определению статической жесткости сборок переборочного уплотнения: 1 – динамометр; 2 – переходник; 3 – индикатор перемещений; 4 – вертикальный массив железобетонного фундамента; 5 – монтажная плита горизонтального массива железобетонного фундамента; 6 – кронштейн

Fig. 4. Test setup to determine static stiffness of bulkhead seal assemblies: 1 – dynamometer; 2 – adaptor; 3 – displacement indicator; 4 – vertical body of RC foundation; 5 – bedplate of horizontal RC; 6 – strut



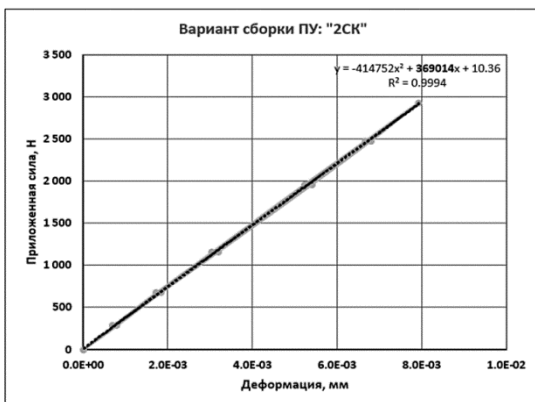
переходник 2, соединяющий входные фланцы СК/СК + ТРМЭ, перемещается вертикально с помощью талрепа, соединенного с переходником через динамометр 1, который измерял величину приложенной статической силы. Величина перемеще-

ния переходника относительно поверхности монтажной плиты 5 измерялась с помощью индикатора перемещений 3.

Значения силы, приложенной к переходнику, и перемещений переходника, измеренные для одного

Вариант сборки: "2СК"

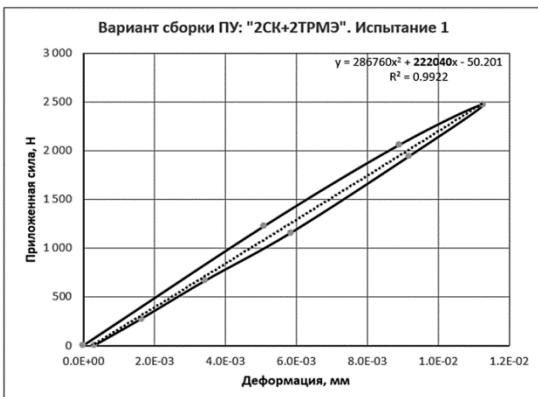
Деформация, м	Сила, Н
0.00E+00	0.00E+00
7.00E-04	2.84E+02
1.73E-03	6.77E+02
3.05E-03	1.16E+03
5.23E-03	1.96E+03
6.67E-03	2.47E+03
7.93E-03	2.92E+03
6.80E-03	2.47E+03
5.41E-03	1.96E+03
3.19E-03	1.16E+03
1.84E-03	6.77E+02
7.90E-04	2.84E+02
0.00E+00	0.00E+00



а)

Вариант сборки "2СК+2ТРМЭ"
 № испытания: 1

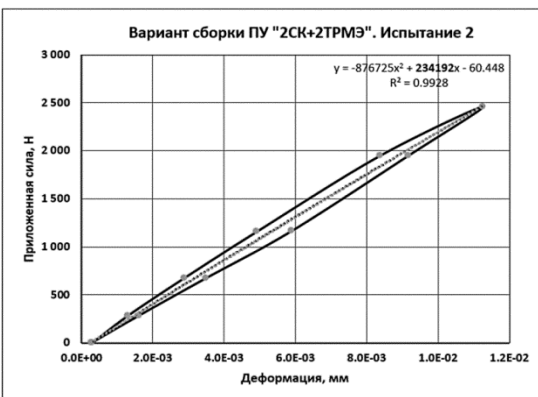
Деформация, м	Сила, Н
0.00E+00	0.00E+00
5.10E-03	1.23E+03
8.91E-03	2.06E+03
1.13E-02	2.47E+03
9.18E-03	1.94E+03
5.85E-03	1.16E+03
3.44E-03	6.67E+02
1.63E-03	2.74E+02
3.10E-04	0.00E+00



б)

Вариант сборки "2СК+2ТРМЭ"
 № испытания: 2

Деформация, м	Сила, Н
3.10E-04	0.00E+00
1.31E-03	2.84E+02
2.89E-03	6.76E+02
4.91E-03	1.16E+03
8.38E-03	1.95E+03
1.13E-02	2.46E+03
9.17E-03	1.95E+03
5.90E-03	1.17E+03
3.50E-03	6.76E+02
1.61E-03	2.84E+02
2.80E-04	0.00E+00



в)

Рис. 5. Результаты испытаний по определению статической жесткости сборок переборочных уплотнений: а) испытание сборки «2СК»; б) испытание № 1 сборки «2СК + 2ТРМЭ»; в) испытание № 2 сборки «2СК + 2ТРМЭ»

Fig. 5. Test data on static stiffness of bulkhead seal assemblies: a) test of 2CK assembly; b) test No. 1: 2CK + 2 TRME assembly; c) test No. 2: 2CK + 2 TRME assembly

Таблица 1. Статические жесткости сборок переборочных уплотнений

Table 1. Static stiffness of bulkhead seal assemblies

Сборка ПУ	Испытание	Второй коэффициент аппроксимирующего полинома	Статическая жесткость сборки ПУ, Н/м
«2СК»	1	369 014	369 014
«2СК+2ТРМЭ»	1	222 040	228 040
	2	234 591	

цикла нагружения-разгрузки сборки «2СК» и двух циклов нагружения-разгрузки сборки «2СК+2ТРМЭ» приведены в таблицах на рис. 5.

На рис. 5 справа от таблиц представлены:

- нагрузочные характеристики сборок, построенные по данным, измеренным для каждого цикла нагрузки-разгрузки;
- линии тренда, рассчитанные для каждого цикла нагрузки-разгрузки;
- математические выражения аппроксимирующих полиномов второй степени $y(x)$ и значения показателей достоверности аппроксимации R^2 для каждой линии тренда.

Статические жесткости сборок ПУ, определенные по значению постоянного коэффициента при аргументе в первой степени в аппроксимирующем полиноме, приведены в табл. 1.

Поскольку каждая сборка состоит из двух механически параллельно соединенных ПУ, то собственные статические жесткости каждого отдельного ПУ составляют половину из приведенных в табл. 1 расчетных величин. Таким образом, статическую жесткость, определенную в радиальном направлении, принимаем равной:

- $1,85 \cdot 10^5$ Н/м для одного СК;
- $1,14 \cdot 10^5$ Н/м для СК, соединенного с ТРМЭ.

Сравнительный анализ результатов измерения статических характеристик испытанных сборок ПУ в вертикальном направлении позволяет сделать следующие выводы:

- механически последовательное соединение СК с ТРМЭ позволило уменьшить статическую жесткость сборки в 1,6 раза;
- существенное увеличение площади поверхности, находящейся внутри петли гистерезиса цикла нагрузки-разгрузки, свидетельствует о существенном улучшении диссипативных свойств сборки «2СК+2ТРМЭ» по сравнению со сборкой «2СК».

Определение динамической (вибрационной) жесткости переборочных уплотнений

Determination of BS dynamic (vibration) stiffness

Для каждой сборки ПУ определялись динамические жесткости в горизонтально-радиальном направлении по схеме, представленной на рис. 6.

Входные фланцы «СК 1» жестко соединяются через переходник 6. Один из выходных фланцев сборки ПУ через силоизмерительную платформу 7

Рис. 6. Схема испытаний по определению динамической жесткости сборок переборочного уплотнения:

1 – переборочное уплотнение; 2 – низкочастотный подвес; 3 – железобетонный массив; 4 – вибростенд; 5 – датчик силы; 6 – переходник; 7 – силоизмерительная платформа; 8 – кронштейн; B1 – точка возбуждения; A1, A2 – точки измерения виброускорения

Fig. 6. Test setup to determine dynamic stiffness of bulkhead seal assemblies: 1 – bulkhead seal; 2 – low-frequency suspension; 3 – RC foundation; 4 – vibration test bed; 5 – force transducer; 6 – adapter; 7 – force measuring platform; 8 – strut; B1 – excitation point; A1, A2 – measuring points of vibration accelerations

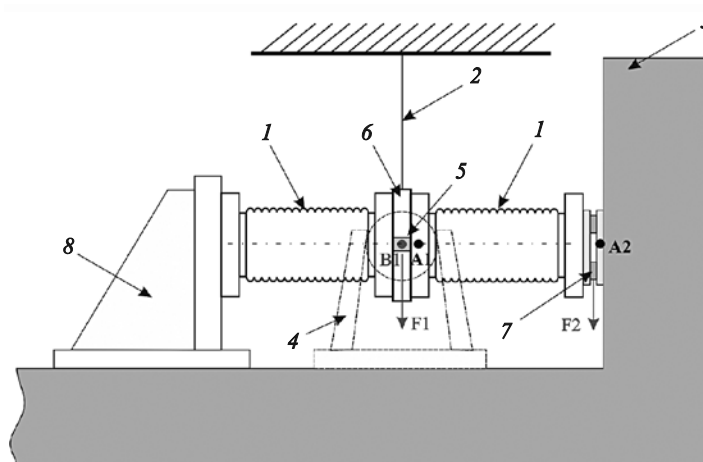


Таблица 2. Динамические характеристики сборок переборочных уплотнений

Table 2. Dynamic stiffness of bulkhead seal assemblies

Сборка ПУ	Частота резонанса, Гц	Динамическая жесткость, Н/м	Коэффициент потерь
«2СК»	9,75	$4,02 \cdot 10^5$	0,041
«2СК + 2ТРМЭ»	8,25	$3,14 \cdot 10^5$	0,076

жестко крепится к монтажной плите вертикального массива железобетонного фундамента 3. Второй фланец жестко крепится к кронштейну 8, который жестко соединяется с монтажной плитой горизонтального массива фундамента 3. Для компенсации прогиба сборки ПУ под собственным весом переходник 6 вывешен на низкочастотном подвесе 2. В процессе испытаний возбуждение колебаний переходника осуществлялось электродинамическим вибростендом 4, соединенным жестко через датчик силы 5 с переходником 6. Выполнены синхронные измерения спектральных и взаимных спектральных характеристик сигналов сил и виброускорений в указанных выше точках. Тип сигнала возбуждения: широкополосный сигнал типа «белый шум» в полосе частот 2 Гц ... 2 кГц.

Полученные значения динамической жесткости и коэффициента механических потерь приведены в табл. 2.

Сравнительный анализ результатов измерения динамических характеристик испытанных сборок ПУ

в горизонтально-радиальном направлении позволяет сделать следующие выводы:

- механически последовательное соединение СК с ТРМЭ позволило уменьшить динамическую жесткость сборки ПУ в 1,3 раза;
- коэффициент механических потерь сборки «2СК + 2ТРМЭ» увеличился в 1,9 раза по сравнению с коэффициентом механических потерь сборки «2СК», что хорошо согласуется с выводом о положительном влиянии ТРМЭ на диссипативные свойства ПУ при измерениях статической жесткости.

Определение виброизолирующей эффективности переборочных уплотнений

Determination of BS vibration isolation efficiency

Схема испытаний по измерению виброускорений для определения виброизолирующей эффективности сборок ПУ приведена на рис. 7.

Виброускорения измерялись в точках A1 (до) и A2 (после) в трех взаимно перпендикулярных направлениях (вертикальном Z, осевом X и горизонтально-радиальном Y) при возбуждении колебаний в направлении Y электродинамическим вибростендом в точке B1. Контроль за соблюдением условий по эквивалентности уровней возбуждения при испытаниях разных сборок ПУ осуществлялся по показаниям индикаторов и положению выходных аттенуаторов генератора сигналов и усилителя мощности вибростенда.

Определение виброизолирующей эффективности установки ТРМЭ в составе ПУ производилось в соответствии с ГОСТ 24346-80 путем определения коэффициента эффективности вибрационной защиты (КЭ_{ви}), который представляет собой отношение среднеквадратического значения (СКЗ) виброускорения ПУ до установки ТРМЭ к значению той же величины после установки ТРМЭ. В случае испытаний по схеме, изображенной на рис. 7, это отношение СКЗ виброускорения в точке A2 при испыта-

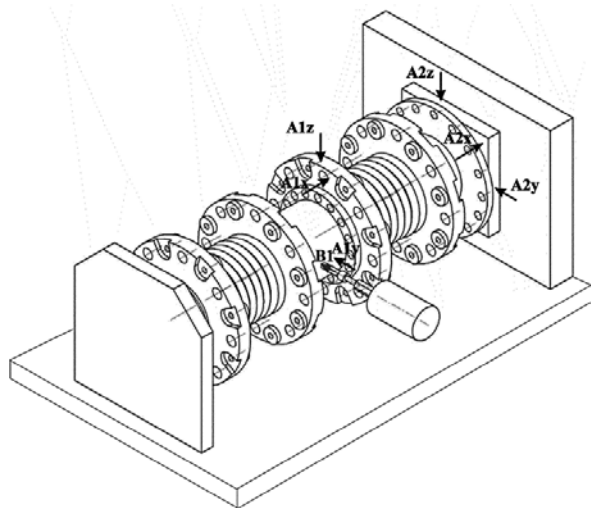


Рис. 7. Схема измерения виброускорений сборок переборочного уплотнения

Fig. 7. Test setup to measure vibration accelerations of bulkhead seal assemblies

Рис. 8. Коэффициенты эффективности вибрационной защиты сборки «2СК + 2ТРМЭ» относительно сборки «2СК»

Fig. 8. Efficiency coefficients of vibration protection for 2СК + 2TRME assembly as compared to 2СК assembly



ниях сборки «2СК» к СКЗ виброускорения в той же точке при испытаниях сборки «2СК + 2ТРМЭ»:

$$КЭ_{ВИ}(f_i) = 20 \lg \frac{СКЗ_{СК}^{A2}(f_i)}{СКЗ_{СК+ТРМЭ}^{A2}(f_i)}, \text{ дБ},$$

где $СКЗ_{СК}^{A2}(f_i)$ и $СКЗ_{СК+ТРМЭ}^{A2}(f_i)$ – среднеквадратические значения виброускорения в 1/3-октавной полосе со среднегеометрической частотой f_i , измеренные в точке $A2$, при испытаниях по схеме, изображенной на рис. 7, сборок «2СК» и «2СК + 2ТРМЭ» соответственно.

Несмотря на то, что при проведении испытательного вибровозбуждения сборок ПУ «2СК + 2ТРМЭ» и «2СК» с помощью электродинамического вибратора выполнялось только в горизонтально-радиальном направлении, оценка эффективности применения ТРМЭ в составе ПУ была выполнена по всем трем контролируемым направлениям измерений.

На рис. 8 представлены 1/3-октавные спектры $КЭ_{ВИ}$ для трех взаимно перпендикулярных направ-

лений, рассчитанные по данной формуле по результатам измерений виброускорений при испытаниях обеих сборок ПУ.

Учитывая сходимость значений коэффициентов эффективности, приведенных на рис. 8, во всех трех контролируемых направлениях, вычисляем сравнительную виброизолирующую эффективность применения ТРМЭ в составе ПУ как среднее энергетическое значение коэффициента эффективности по трем направлениям измерений, используя формулу:

$$\Delta \mathcal{E}_{ВИ}^{\Sigma}(f_i) = 10 \lg \frac{[a_{A2}^Z(f_i)]^2 + [a_{A2}^Y(f_i)]^2 + [a_{A2}^X(f_i)]^2}_{[a_{A2}^Z(f_i)]^2 + [a_{A2}^Y(f_i)]^2 + [a_{A2}^X(f_i)]^2}_{СК+ТРМЭ}, \text{ дБ},$$

где $a_{A2}^Z(f_i)$, $a_{A2}^Y(f_i)$ и $a_{A2}^X(f_i)$ – виброускорения в 1/3-октавной полосе со среднегеометрической частотой f_i , измеренные в точке $A2$ в трех взаимно перпендикулярных направлениях, при испытаниях по схеме, изображенной на рис. 7, сборок «2СК»

Рис. 9. Сравнительная виброизолирующая эффективность сборки «2СК + 2ТРМЭ» относительно сборки «2СК»

Fig. 9. Comparison of vibration isolation protection for 2СК + 2TRME assembly and 2СК assembly



(нижний индекс суммы СК) и «2СК + 2ТРМ» (нижний индекс суммы СК + ТРМЭ) соответственно.

Результаты расчета сравнительной виброизолирующей эффективности представлены на рис. 9.

Анализ полученных результатов измерений и их постспектральной обработки позволяет сделать следующие выводы:

- в диапазоне частот до 100 Гц полученные значения коэффициентов виброизолирующей эффективности (рис. 8) и сравнительной виброизолирующей эффективности (рис. 9) не могут рассматриваться как достоверные, т.к. функция когерентности между сигналами виброускорений, наблюдаемыми в точках А1 и А2, близка к 0;
- в 1/3-октавных полосах со среднегеометрическими частотами от 100 до 250 Гц виброизолирующая эффективность сборки «2СК + 2ТРМЭ» выше виброизолирующей эффективности сборки «2СК» с максимумом на 20 дБ в 1/3-октавной полосе со среднегеометрической частотой 160 Гц;
- в 1/3-октавной полосе со среднегеометрической частотой 315 Гц обе сборки обладают практически одинаковой виброизолирующей эффективностью;
- в 1/3-октавных полосах со среднегеометрическими частотами от 400 до 8000 Гц виброизолирующая эффективность сборки «2СК + 2ТРМЭ» выше виброизолирующей эффективности сборки «2СК» на 16–38 дБ.

Выводы

Conclusion

Виброизолирующее переборочное уплотнение с ТРМЭ является перспективной конструкцией с улучшенными диссипативными свойствами, которое обладает следующими преимуществами по сравнению с переборочным уплотнением без ТРМЭ:

- позволяет снизить статическую жесткость уплотнения в вертикальном направлении в 1,6 раза, динамическую жесткость уплотнения в горизонтально-радиальном направлении – в 1,3 раза;
- увеличивает коэффициент потерь уплотнения в горизонтально-радиальном направлении в 1,9 раза;
- существенно увеличивает виброизолирующую эффективность уплотнения в диапазонах частот 40–250 Гц и 400–8000 Гц на 6 и более (до 38) дБ.

Рекомендуется устанавливать разработанное виброизолирующее переборочное уплотнение с ТРМЭ в местах прохода трубопроводов виброактивных систем через межотсечные непроницаемые переборки и настилы для снижения вибрации.

Список использованной литературы

1. Переборочное виброизолирующее уплотнение : пат. 2712535 Рос. Федерация / Куклин М.В., Горбунцов И.Е. № 2019106352; заявл. 05.03.2019; опубл. 29.01.2020, Бюл. № 4. 8 с.
2. Вибрации в технике : справочник : в 6 т. Т. 4: Вибрационные процессы и машины // [Г.Г. Азбель, И.И. Блехман, И.И. Быховский и др.]. Москва : Машиностроение, 1981. 509 с.
3. Куклин М.В. Судовое виброизолирующее переборочное уплотнение // Судостроение. 2023. № 2. С. 60–63.

References

1. Bulkhead vibration isolation seal. Patent 2712535 Russian Federation / M.V. Kuklin, I.E. Gorbuntsov. No. 2019106352. Appl. date 05.03.2019; publ. date 29.01.2020. Bul. No. 4. 8 p. (in Russian).
2. Vibration in technology: handbook: in 6 vol. Vol. 4. Vibration processes and machines // [G.G. Azbel, I.I. Blekhan, I.I. Bykhovskiy [et al.]. Moscow: Mashinostroenie, 1981. 509 p. (in Russian).
3. Kuklin M.V. Ship bulkhead vibration isolation seal // Sudostroenie. 2023. Vol. 2. P. 60–63 (in Russian).

Сведения об авторе

Куклин Михаил Васильевич, к.т.н., заместитель начальника управления защиты кораблей и судов по физическим полям – начальник отдела подготовки производства и перспективных разработок АО «ПО „Севмаш“». Адрес: 164500, Россия, Северодвинск, Архангельская обл., Архангельское шоссе, д. 58. Тел.: +7 (8184) 50-50-32. E-mail: kuklinmikhail@rambler.ru.

About the author

Mikhail V. Kuklin, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Head, Ship Signature Control Directorate, Head of Department for Production Engineering and Advanced R&Ds, JSC PO Sevماش. Address: 58, Arkhangelskoe sh., Severodvinsk, Arkhangelsk Region, Russia, post code 164500. Tel.: +7 (8184) 50-50-32. E-mail: kuklinmikhail@rambler.ru.

Поступила / Received: 18.11.25
Принята в печать / Accepted: 26.02.26
© Куклин М.В., 2026