

В.Ю. Кирпичников, А.А. Петров, В.Ю. Смольников, Ю.Ф. Шлемов, Е.В. Яковлева
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЗОНИРУЮЩИХ ПОЛОСОВЫХ ВИБРОПОГЛОТИТЕЛЕЙ ПРИ УСТАНОВКЕ НА ТРУБЧАТУЮ КОНСТРУКЦИЮ

Объект и цель научной работы. Исследование влияния резонирующих полосовых вибропоглоателей (РПВ) на вибрации трубчатой конструкции (трубы).

Материалы и методы. Измерения уровней вибрации трубы без РПВ и при их установке. Эффективность РПВ определена по разнице уровней вибрации трубы при их отсутствии и наличии.

Основные результаты. Установка РПВ приводит к уменьшению уровней низшего резонансного максимума в спектре вибрации трубы. Настройка низшей собственной частоты изгибных колебаний РПВ на частоту указанного максимума существенно повышает их эффективность в сравнении с ненастроенными РПВ.

Закключение. Показана возможность существенного уменьшения уровней вибрации трубы путем установки на нее РПВ с малой массой и большими потерями колебательной энергии.

Ключевые слова: труба, вибрация, резонансный максимум, полосовые вибропоглоатели, эффективность, настройка.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

Для цитирования: Кирпичников В.Ю., Петров А.А., Смольников В.Ю., Шлемов Ю.Ф., Яковлева Е.В. Экспериментальные исследования эффективности резонирующих полосовых вибропоглоателей при установке на трубчатую конструкцию. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; 1(383): 107–112.

УДК 534.83+534.6

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-1-383-107-112

SHIP SIGNATURES

V. Kirpichnikov, A. Petrov, V. Smolnikov, Yu. Shlemov, Ye. Yakovleva
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

EFFICIENCY OF RESONATING ANTI-VIBRATION STRAPS APPLICATION ON TUBULAR: EXPERIMENTAL STUDIES

Object and purpose of research. This paper studies vibration damping efficiency of resonating anti-vibration straps (RAVS) applied on tubular structure (pipe).

Materials and methods. Vibration measurements of pipe with and without RAVS. Efficiency of RAVS is determined as the difference in vibration levels of the pipe without RAVS and with them.

Main results. RAVS reduces the level of lower resonance peaks in pipe vibration spectrum. RAVS will become significantly more efficient if their natural bending frequency is tuned with the frequency of this peak.

Conclusion. It has been shown that light-weight RAVS with high vibration energy losses can significantly reduce pipe vibration levels.

Key words: pipe, vibration, resonance peak, anti-vibration straps, efficiency, tuning.

Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

For citations: Kirpichnikov V., Petrov A., Smolnikov V., Shlemov Yu., Yakovleva Ye. Efficiency of resonating anti-vibration straps application on tubular: experimental studies. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; 1(383): 107–112 (in Russian).

УДК 534.83+534.6

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-1-383-107-112

Об увеличении поглощения колебательной энергии в пластинах судовых конструкций с помощью резино-металлических антивибраторов, обладающих, помимо виброизолирующего эффекта, также и вибропоглощающим действием, указывалось в работе [1]. Рассматривался простейший тип такого антивибратора, представляющий собой металлическую массу (M), соединенную с колеблющейся пластиной с помощью резинового диска или кольца (рис. 1). В частности, было показано, что коэффициент потерь пластины (η) с подобным антивибратором, установленным в пучности моды (формы) ее изгибных колебаний, имеет максимум на резонансной частоте антивибратора. Для расчета $\eta_{\max}$ приведена следующая формула:

$$\eta_{\max} = \frac{4M}{M_{\text{пл}} \eta_1},$$

где $M_{\text{пл}}$ – масса пластины; η_1 – коэффициент потерь в резиновом элементе.

Из приведенной формулы следует, что эффективность резино-металлического антивибратора с вибропоглощающим действием растет с увеличением отношения $M/M_{\text{пл}}$, т.е. его относительной массы, и снижается с повышением потерь колебательной энергии в резиновом элементе. Практическая реализация описанного средства уменьшения резонансных колебаний конструкций ограничена как его очевидным технологическим недостатком в обеспечении надежного крепления массы на конструкции, так и физическими особенностями

работоспособности, связанными, например, с ухудшением эффективности из-за неизбежного снижения массой резонансной частоты конструкции [2]. Этих недостатков в силу своей малой массы лишены резонирующие пластинчатые или полосовые вибропоглощители с большим коэффициентом потерь колебательной энергии. Повышенное вибропоглощение в РПВ достигается путем облицовки металлических пластин или полос РПВ армированным вибропоглощающим покрытием (ВПП). В качестве армирующего слоя ВПП используются существенно (в 5–10 раз) более тонкие металлические пластины или полосы. Диссипативным слоем является материал с большим вибропоглощением. Наиболее перспективными для достижения наибольшего эффекта оказались ВПП с диссипативным слоем на основе поливинилацетата (полимерной ВПС пленки) – «рекордсмена» по вибропоглощающей эффективности среди используемых материалов [3].

Высокая эффективность описанных РПВ при их малой массе подтверждена экспериментальными исследованиями при их установке на пластины и оболочки [4–6]. В работе [7] приведены результаты исследования по определению влияния места установки резонирующего полосового вибропоглопителя на его эффективность. Показано, что существенно большая эффективность РПВ с армированным ВПП достигается при условно точечном соединении его геометрического центра с демпфируемой пластиной в зоне пучности формы ее изгибных колебаний с резонансной частотой, на которую настроен вибропоглотитель.

Исследования возможности использования описанных резонирующих вибропоглощителей для уменьшения уровней низкочастотной вибрации трубчатых конструкций до настоящего времени не проводились.

Испытанная конструкция имела вид составной трубы, на одном из торцов которой был установлен электродинамический вибровозбудитель (рис. 2а). Низшая резонансная частота изгибных колебаний трубы при действии на нее вертикальной силы

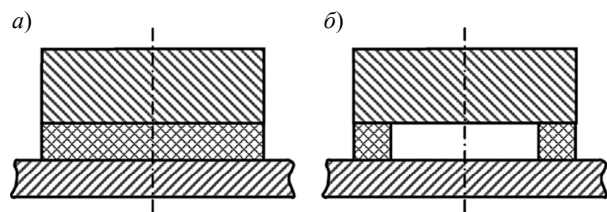


Рис. 1. Конструкции резино-металлических антивибраторов: а) с резиновым диском; б) с резиновым кольцом

Fig. 1. Designs of rubber-metal vibration dampers: а) with rubber disk; b) with rubber ring

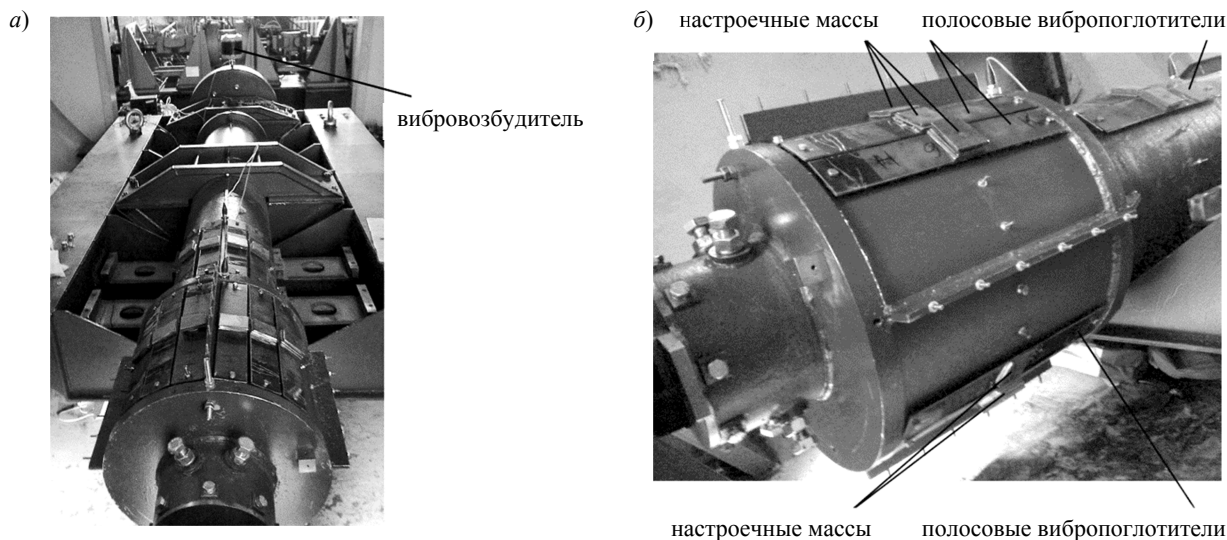


Рис. 2. Рамная конструкция с резонирующими полосовыми вибропоглотителями

Fig. 2. A frame with resonating anti-vibration straps applied on it

равнялась 42 Гц. Форма колебаний трубы на указанной частоте имела максимумы на ее торцах и в средней части.

С учетом конструктивного оформления трубы резонирующие полосовые вибропоглотители устанавливались на две ее соседние обечайки, наиболее удаленные от вибровозбудителя (рис. 2б).

Были испытаны полосовые РПВ двух типов – с одноопорным (в геометрическом центре) и двухопорным (у торцов) креплением к трубе. Схемы

РПВ и узлов их соединения с трубой приведены на рис. 3. Толщина (h) полос РПВ принималась равной $1,5 \cdot 10^{-3}$ м, что в 20 раз меньше толщины наиболее удаленной от вибровозбудителя торцевой обечайки, на которую устанавливались вибропоглотители. Длина ($\ell = 0,38$ м) и ширина ($b = 0,06$ м) РПВ выбирались с учетом возможности их установки на обечайки трубы с подкреплениями на их поверхности. Ориентировочное значение толщины (h , м) стальной полосы определялось с учетом настройки низ-

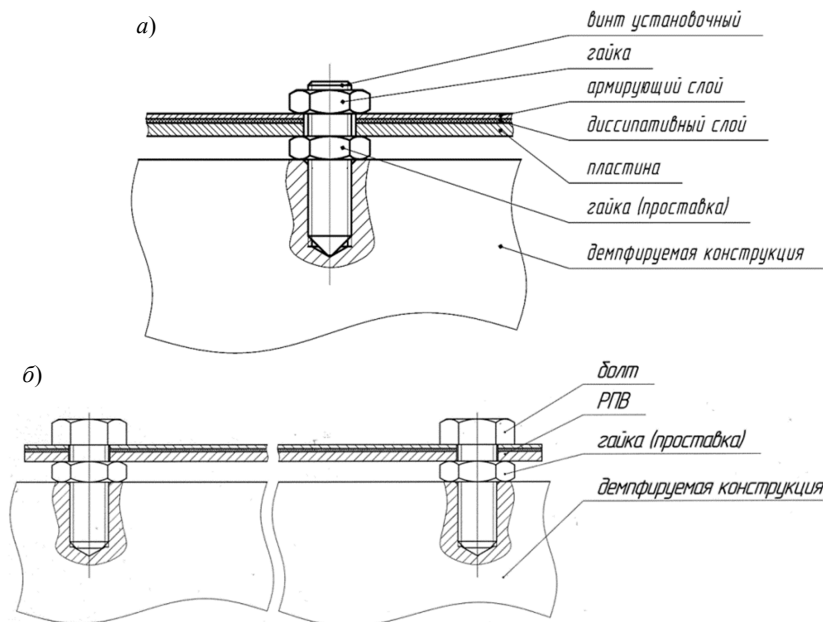


Рис. 3. Схемы установки РПВ:

а) одноопорное крепление,
б) двухопорное крепление

Fig. 3. RAVS installation layouts:

а) with one fastening;
б) with two fastenings

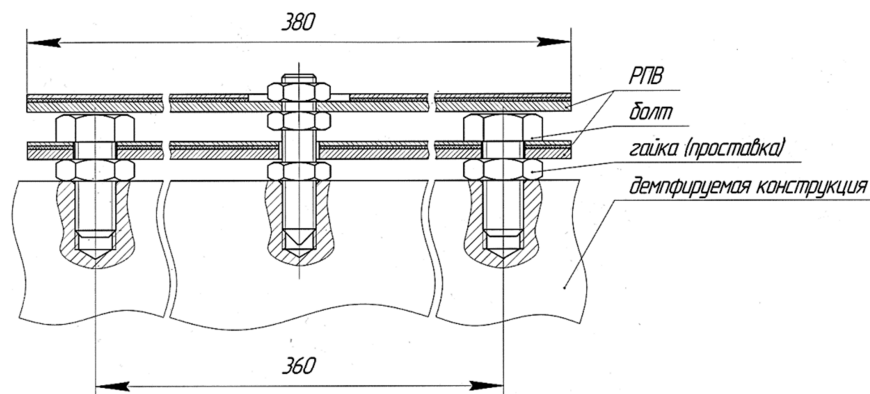


Рис. 4. Схема установки РПВ с одноопорным креплением над РПВ с двухопорным креплением

Fig. 4. Installation of a single-fastening RAVS above a double-fastening one

шей резонансной частоты (f_1 , Гц) ее изгибных колебаний на частоту 42 Гц.

Использовалась формула [8]:

$$f_1 = \alpha_1 \sqrt{\frac{D}{m\ell^4}},$$

где коэффициент α_1 принимался равным 0,57 (одноопорное крепление полосы в Гц; ℓ – половина длины полосы) и 3,57 (двухопорное крепление полосы у торцов; ℓ – длина полосы); D , m – изгибная жесткость ($Eh^3b/12$) и масса (ρhb) единицы длины полосы.

В качестве армирующего слоя ВПП использовались полосы кровельного железа толщиной $0,18 \cdot 10^{-3}$ м. Диссипативный слой ВПП выполнялся из полимерной пленки ВПС толщиной $0,5 \cdot 10^{-3}$ м. При выборе толщины полосы было учтено, что нанесение описанного ВПП может несколько уменьшить значение низшей частоты ее изгибных колебаний.

Было изготовлено 54 полосовых резонансных вибропоглотителя. Сначала испытания эффективности РПВ выполнялись при следующих вариантах установки:

- 54 РПВ при одноопорном креплении;
- 54 РПВ при двухопорном креплении;

- 27 РПВ при одноопорном креплении над двадцатью семью РПВ с двухопорным креплением (рис. 4).

Относительная масса РПВ, устанавливаемых на каждом этапе испытаний, составляла ~4 % от массы трубы. Измерения спектров вибраций РПВ при возбуждении трубы показали, что низшая резонансная частота изгибных колебаний одноопорных РПВ оказалась меньше (порядка 30–35 Гц), а двухопорных – больше (порядка 60–80 Гц) расчетного значения (42 Гц).

В результате выполненных измерений было установлено, что во всех случаях размещение на трубе РПВ уменьшает уровни низшего резонансного максимума ее изгибных колебаний на величину порядка 6–7 дБ.

Дальнейшие испытания выполнялись с использованием двухопорных РПВ, резонансная частота которых настраивалась на низшую резонансную частоту трубы размещением в зоне их геометрического центра настроечных масс из стальных полос толщиной $1,5 \cdot 10^{-3}$ м. Схема РПВ и узлов его соединения с демпфируемой конструкцией приведена на рис. 5.

Измерения уровней вибрации трубы проводились при установке на нее шести, двенадцати

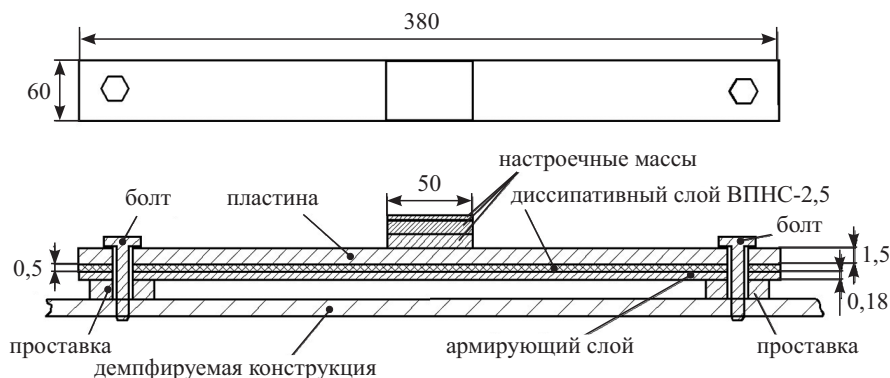


Рис. 5. Схема установки РПВ с настроечными массами

Fig. 5. Installation of RAVS with tuning masses

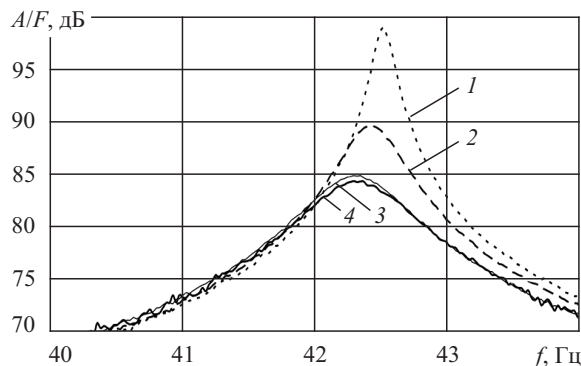


Рис. 6. Спектры вибрации трубчатой конструкции при отсутствии (1) и наличии шести (2), двенадцати (3) и шестнадцати (4) резонирующих полосовых вибропоглоителей

Fig. 6. Pipe vibration spectra without RAVS (1) and with six (2), twelve (3) and sixteen (4) RAVS

и шестнадцати РПВ. Типичные спектры вибрации конструкции при отсутствии и установке РПВ приведены на рис. 6. Обращаясь к рисунку, видим, что эффект от установки шести и двенадцати вибропоглоителей равен 9 и 14 дБ соответственно. Их масса составляла 0,9 и 1,7% от массы конструкции. Все они были размещены на верхнем и (или) нижнем сегменте торцевой обечайки трубы, возбуждаемой вертикальной силой. Установка на соседнюю обечайку, более удаленную от пучности резонансной формы колебаний трубы, четырех дополнительных вибропоглоителей к увеличению эффективности практически не привела.

Отметим, что уменьшение уровней низшего резонансного максимума в спектрах вибрации трубы при установке РПВ на торцевой обечайке трубы достигалось без повышения вибрации на других частотах.

Измеренные величины эффективности частотно настроенных РПВ практически совпали с расчетной оценкой, выполненной с использованием формулы

$$\Xi = 20 \lg \frac{\eta_{\text{РПВ}}}{\eta_{\text{тр}}} + 20 \lg \mu + 21, \text{ дБ},$$

где $\eta_{\text{РПВ}}$ и $\eta_{\text{тр}}$ – коэффициент потерь колебательной энергии в РПВ ($\eta_{\text{РПВ}} = 0,1$) и трубе ($\eta_{\text{тр}} = 0,0035$) соответственно; μ – масса резонансных вибропоглоителей, отнесенная к массе трубы.

Были сделаны следующие выводы:

- уменьшение уровней низшего резонансного максимума в спектре вибрации трубчатой конструкции может быть достигнуто установкой

на нее резонирующих полосовых вибропоглоителей, имеющих при малой массе большие потери колебательной энергии;

- настройка низшей резонансной частоты изгибных колебаний полосовых РПВ на низшую резонансную частоту изгибных колебаний трубчатой конструкции приводит к большему уменьшению уровней вибрации при существенно меньшем их числе в сравнении с ненастроенными РПВ.

Авторы благодарят А.П. Косчеева и А.А. Шантурина за изготовление испытанных вибропоглоителей и установку их на трубчатой конструкции.

Библиографический список

References

1. *Никифоров А.С., Будрин С.В.* Распространение и поглощение звуковой вибрации на судах. Л.: Судостроение, 1968. [Propagation and damping of acoustic vibration aboard ships. Leningrad: Sudostroyeniye, 1968. (in Russian)].
2. *Кирпичников В.Ю., Смольников В.Ю., Косчеев А.П.* Влияние сосредоточенного груза на вибрационные характеристики пластины // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2016. Вып. 91(375). С. 215–230. [V. Kirpichnikov, V. Smolnikov, A. Koscheev. Effect of cargo in the resonance crest area of the plate upon its vibration parameters // KSRC Transactions. 2016; 91(375): 215–30. (in Russian)].
3. *Кирпичников В.Ю., Сятковский А.И.* Уменьшение вибрации конструкций тонкими армированными покрытиями на основе полимерной ВПС пленки // Сборник докладов VI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Защита от повышенного шума и вибрации. СПб., 2017. С. 382–388. [V. Kirpichnikov, A. Syatkovsky. Structural vibration damping by means of reinforced coatings based on polymeric VPS films // Compendium of papers, The VI Russian scientific-practical conference with international participation Protection from High Noise & Vibration. St. Petersburg, 2017: 382–8. (in Russian)].
4. *Кирпичников В.Ю., Косчеев А.П.* Уменьшение уровней вибраций и звукоизлучения оболочки на низшей собственной частоте ее упругих колебаний // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2010. Вып. 52(336). С. 119–128. [V. Kirpichnikov, A. Koscheev. Mitigation of vibration and noise radiation of shell at the lowest natural frequency of its elastic vibrations // KSRC Transactions. 2010; 52(336): 119–28. (in Russian)].
5. *Кирпичников В.Ю., Смольников В.Ю., Шлемов Ю.Ф.* Уменьшение уровней низкочастотной вибрации кон-

- струкций с помощью резонирующих пластинчатых вибропоглочителей // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. Вып. 92(376), стр. 273–284, СПб, 2016. [V. Kirpichnikov, V. Smolnikov, Yu. Shlemov. Mitigation of low-frequency structural vibration by means of vibration dampers (resonating plates) // KSRC Transactions. 2016; 92(376): 273–84. (in Russian)].
6. Кирпичников В.Ю., Кощеев А.П., Мукалов Ю.Н., Шлемов Ю.Ф. О возникновении и уменьшении максимумов в спектрах вибрации обтекаемой пластины с отверстием // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2017. Вып. 3(381). С. 117–122. [V. Kirpichnikov, A. Koscheev, Yu. Mukalov, Yu. Shlemov. On generation and decrease of the maximums in the vibration spectra of the perforated plate in the flow // KSRC Transactions. 2017; 3(381): 117–22. (in Russian)].
 7. Кирпичников В.Ю., Кощеев А.П., Савенко В.В., Смольников В.Ю. Влияние места и способа установки резонирующего пластинчатого вибропоглочителя на его эффективность // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2017. Вып. 2(380). С. 131–136. [V. Kirpichnikov, A. Koscheev, V. Savenko, V. Smolnikov. Resonating anti-vibration plate: effect of location and installation method upon its efficiency // KSRC Transactions. 2017; 2(380): 131–6. (in Russian)].
 8. Никифоров А.С. Акустическое проектирование судовых конструкций. Л.: Судостроение, 1990. [A. Niki-forov. Acoustic design of ship structures. Leningrad: Sudostroyeniye, 1990. (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. Телефон: 8 (812) 415-48-01. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.
Петров Александр Александрович, ведущий инженер ФГУП «Крыловский государственный научный центр».

Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Телефон: 8 (812) 415-50-28. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Смольников Василий Юрьевич, ведущий инженер ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Телефон: 8 (812) 415-31-47. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Шлемов Юрий Федорович, заместитель начальника отделения – начальник лаборатории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Телефон: 8 (812) 415-45-47. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.
Яковлева Елена Владимировна, инженер 1 категории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Телефон: 8 (812) 415-31-47. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

About the authors

Kirpichnikov, Valery Yu., D. Sc., Professor, Principal Research Scientist, Krylov State Research Centre. Address: Moskovskoe shosse 44, St. Petersburg, 196158, Russia. Tel.: 8 (812) 415-48-01. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.
Petrov, Aleksandr A., Leading engineer, Krylov State Research Centre. Address: Moskovskoe shosse 44, St. Petersburg, 196158, Russia. Tel.: 8 (812) 415-50-28. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.
Smolnikov, Vasily Yu., Leading engineer, Krylov State Research Centre. Address: Moskovskoe shosse 44, St. Petersburg, 196158, Russia. Tel.: 8 (812) 415-31-47. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.
Shlemov, Yuri F., Deputy Head of Division – Head of Laboratory, Krylov State Research Centre. Address: Moskovskoe shosse 44, St. Petersburg, 196158, Russia. Tel.: 8 (812) 415-45-47. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.
Yakovleva, Elena V., Engineer 1st category Krylov State Research Centre. Address: Moskovskoe shosse 44, St. Petersburg, 196158, Russia. Tel.: 8 (812) 415-31-47. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Поступила / Received: 07.02.18
Принята в печать / Accepted: 05.03.18
© Коллектив авторов, 2018