УДК 534.833.532
EDN: YWVLLC

В.Ю. Кирпичников, В.В. Савенко, В.Ю. Смольников
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЯГКОГО ВИБРОПОГЛОЩАЮЩЕГО ПОКРЫТИЯ С ВОЗДУШНЫМИ ПОЛОСТЯМИ

Объект и цель научной работы. Объектом является мягкое вибропоглощающее покрытие (ВПП) малой толщины. Цель исследования – экспериментальное определение эффективности заполнения воздушных полостей полимерной пленкой или армированным вибропоглощающим покрытием на ее основе.
Материалы и методы. Сравнение измеренных частотных спектров вибрации демпфируемой пластины при отсутствии и нахождении в воздушных полостях ВПП дополнительных средств вибропоглощения.
Основные результаты. Приведены экспериментальные величины эффективности уменьшения уровней вибрации пластины мягким покрытием с последовательно установленными в полостях дополнительными средствами вибропоглощения в сравнении со случаем их отсутствия.
Заключение. Показана практически нулевая эффективность полимерной пленки и высокая эффективность армированного вибропоглощающего покрытия на ее основе.
Ключевые слова: демпфируемая пластина, мягкое вибропоглощающее покрытие, воздушные полости, дополнительные средства вибропоглощения, полимерная пленка, армированное вибропоглощающее покрытие, эффективность.
Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

UDC 534.833.532
EDN: YWVLLC

V.Yu. Kirpichnikov, V.V. Savenko, V.Yu. Smolnikov
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

IMPROVING EFFICIENCY OF SOFT VIBRATION DAMPING COATING WITH AIR CAVITIES

Object and purpose of research. This paper investigates thin soft vibroacoustic coatings in terms of possible improvements in its efficiency through application of additional vibration dampers in its air cavities. The purpose of the study was to experimentally determine the efficiency of filling the cavities with polymeric film or reinforced vibroabsorbing coating based on it.
Materials and methods. Comparison of measured vibration frequency spectra for the damped plate with and without additional vibration dampers in its air cavities.
Main results. The paper presents experimental results for vibration damping levels achieved by the soft coating with various vibration damping tools in its cavities (each tool was investigated separately).
Conclusion. It is shown that polymeric film practically does not improve vibration absorption but the reinforced vibration damping coating based on it is, on the contrary, quite efficient.
Keywords: damped plate, soft vibration damping coating, air cavities, additional vibration dampers, polymeric film, reinforced anti-vibration coating, efficiency.
The authors declare no conflicts of interest.

Мягкие вибропоглощающие покрытия (ВПП) являются одним из основных средств уменьшения уровней вибрации и шумоизлучения различного рода инженерных конструкций. Они представляют собой слой вязкоупругого материала, в качестве которого обычно используют резину [1].

Наибольшую эффективность мягкие ВПП имеют на низких резонансных частотах упругих коле-

Для цитирования: Кирпичников В.Ю., Савенко В.В., Смольников В.Ю. Повышение эффективности мягкого вибропоглощающего покрытия с воздушными полостями. Труды Крыловского государственного научного центра. 2025; 1(411): 152–157.
For citations: Kirpichnikov V.Yu., Savenko V.V., Smolnikov V.Yu. Improving efficiency of soft vibration damping coating with air cavities. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2025; 1(411): 152–157 (in Russian).

баний по их толщине. Низшая из этих частот может быть определена по формуле $f_p = c/4h$, где c – скорость распространения упругих волн в материале ВПП, h – толщина ВПП. Значения f_p существующих резиновых ВПП с небольшой толщиной достаточно высокие, и их эффективность в диапазоне низких и средних звуковых частот оказывается малой.

Для уменьшения частоты повышенной эффективности мягких ВПП за счет улучшения сжимаемости резины их выполняют перфорированными. Коэффициент перфорации – относительного объема воздушных включений в резину – существующих мягких ВПП обычно равен 10 %. К значительному увеличению эффективности покрытий в диапазоне низких и средних звуковых частот указанное мероприятие не приводит. Кроме того, следствием перфорации является снижение потерь колебательной энергии покрытия на высоких частотах [1].

Результаты экспериментальных исследований вибродемпфирующей эффективности тонкого мягкого ВПП с большим (32 %) коэффициентом перфорации при размещении на стальной пластине с размерами в плане 0,522×0,371 м толщиной 3 мм, закрепленной на монтажной рамке (рис. 1),

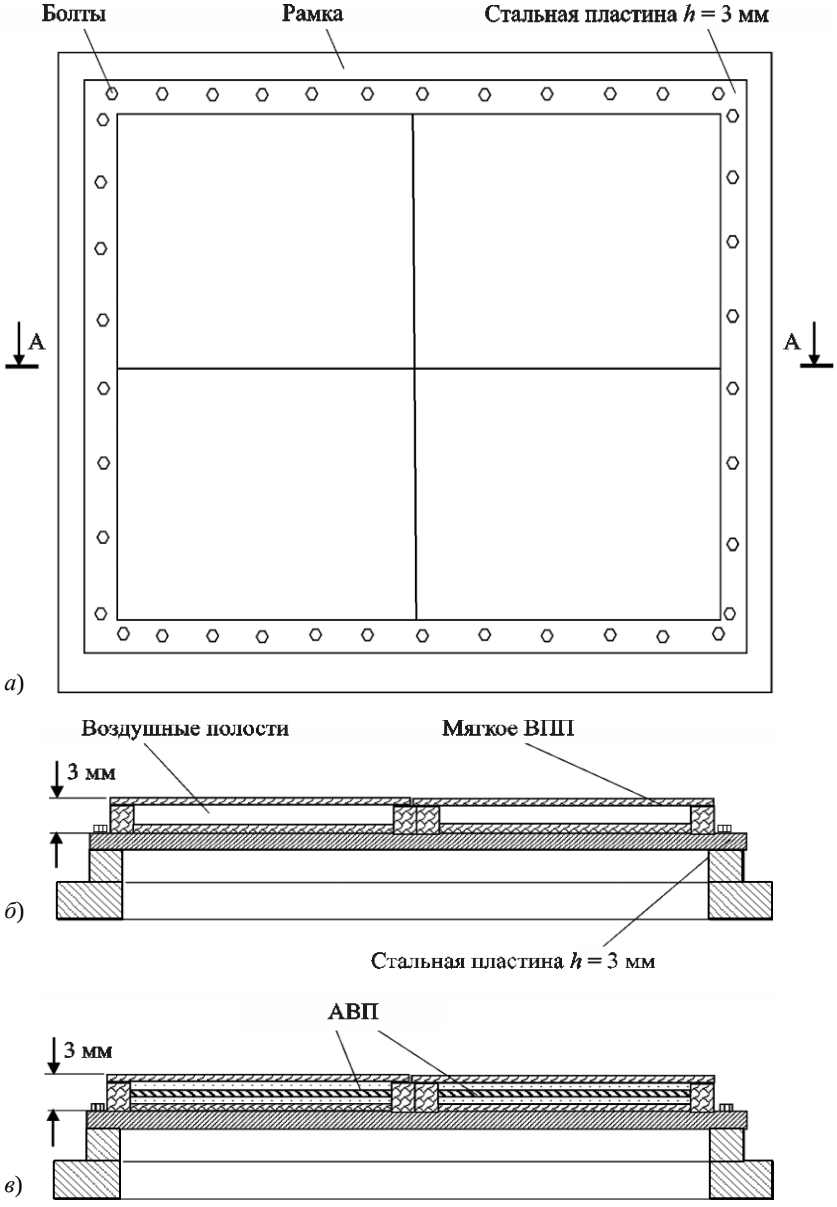

Рис. 1. Схема расположения мягкого вибропоглощающего покрытия:
а) общий вид;
б) без дополнительного средства повышения эффективности;
в) при наличии ВВП в воздушных полостях

Fig. 1. Arrangement of soft anti-vibration coating (*a*) without additional vibration dampers in its cavities (*b*) and with them (*c*)

приведены в работе [2]. Покрытие состояло из двух резиновых листов толщиной 1 мм с промежуточным воздушным слоем такой же толщины. Кромки листов клеевым способом по периметру были соединены с помощью резиновых полос шириной 10 мм.

Эффективность уменьшения покрытием с большими по объему воздушными полостями уровней вибрации пластины на резонансных частотах ее изгибных колебаний в диапазоне от 0 до 1600 Гц приведена на рис. 2. Видно, что наибольшую эффективность такое ВПП имеет на резонансных частотах 1041 Гц (13 дБ), 1093 Гц (11 дБ), 1327 Гц (17 дБ) и 1348 Гц (10 дБ). Наиболее вероятной причиной повышенной эффективности покрытия на указанных частотах является возникновение интенсивных упругих колебаний в покрытии, распространяющихся от демпфируемой пластины в направлении его толщины.

Об этом косвенно свидетельствует сравнительно небольшое, с учетом погрешностей исходных данных и использованных формул, превышение оценочной величины низшей резонансной частоты f_p упругих волн в исследуемом ВПП в направлении толщины над приведенными резонансными частотами его наибольшей эффективности. Оценку f_p выполним с использованием плотности $\rho_1 = 1150$ кг/м^3 и модуля упругости $E_1 = 2{,}25 \cdot 10^7$ Па резины марки 51-2701, из которой изготовлено ВПП, а также объемов резины $V_1 = 0{,}41 \cdot 10^{-3}$ м^3 и воздуха $V_2 = 0{,}19 \cdot 10^{-3}$ м^3 в покрытии.

Плотность покрытия $\rho = \rho_1 V_1/(V_1 + V_2)$ составила 785 кг/м^3, а скорость распространения в нем волн сжатия $c = \sqrt{E/\rho}$ – 23,7 м/с. (Значение модуля объемной упругости $E \approx 4{,}4 \cdot 10^5$ Па покрытия вычислено по формуле [3] $E = (V_1 + V_2)/(V_1/E_1 + V_2/K)$, где в качестве объемной упругости воздуха K принята величина $1{,}4 \cdot 10^5$ Па). Низшая резонансная частота f_p упругих волн в направлении толщины покрытия $f_p = c/4h$ оказалась равной ~1970 Гц. На завышенное расчетное значение f_p и наиболее вероятное его нахождение в диапазоне 1041–1348 Гц указывает малая эффективность ВПП на частотах $f > 1348$ Гц. Невысокой (от 3 до 9 дБ) оказалась эффективность покрытия и на резонансных частотах $f < 1000$ Гц.

Среднее по резонансным частотам и точкам измерения значение коэффициента потерь колебательной энергии демпфируемой пластины с покрытием в диапазоне измерения 0–1600 Гц оказалось достаточно малым (0,014).

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование возможности улучшения вибродемпфирующей эффективности того же мягкого покрытия, установленного на ранее описанной пластине, путем заполнения его воздушных полостей высокоэффективным вибропоглощающим материалом либо армированным вибропоглощающим покрытием на его основе. В качестве такого материала использован поливинилацетат – рекордсмен по вибропоглощению [4].

Эффективностью дополнительного средства назовем превышение уровней узкополосной или третьоктавной входной вибровозбудимости пластины при его отсутствии в сравнении со случаем нахождения средства в воздушных полостях покрытия.

Под входной вибровозбудимостью пластины понимается величина $A/F = 20\lg(AF_0/F\alpha)$, где A, м/с^2 – виброускорение в точке действия на пластину силы F, Н; α – пороговый уровень виброускорения, 10^{-6} м/с^2, $F_0 = 1$ Н. Измерения A/F осуществлялись в четырех точках. Одна находилась в геометрическом центре (ГЦ) пластины, две – на одинаковом кратчайшем расстоянии от ГЦ и ее кромок, а четвертая – на равном расстоянии от ГЦ и одного из углов.

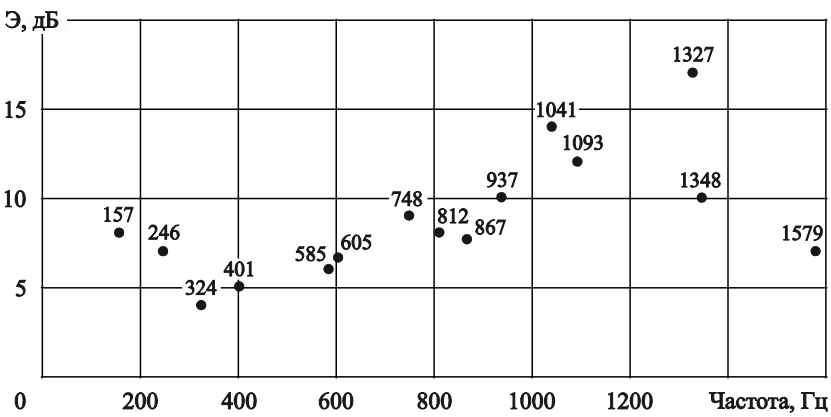

Рис. 2. Эффективность уменьшения уровней резонансных максимумов в спектрах входной вибровозбудимости пластины покрытием с пустыми воздушными полостями (указаны значения частот, помеченных точками)

Fig. 2. Efficiency of resonance peak shaving in the input vibration excitability spectra of the plate achieved by the coating with void air cavities (the numbers are the frequencies marked with dots)

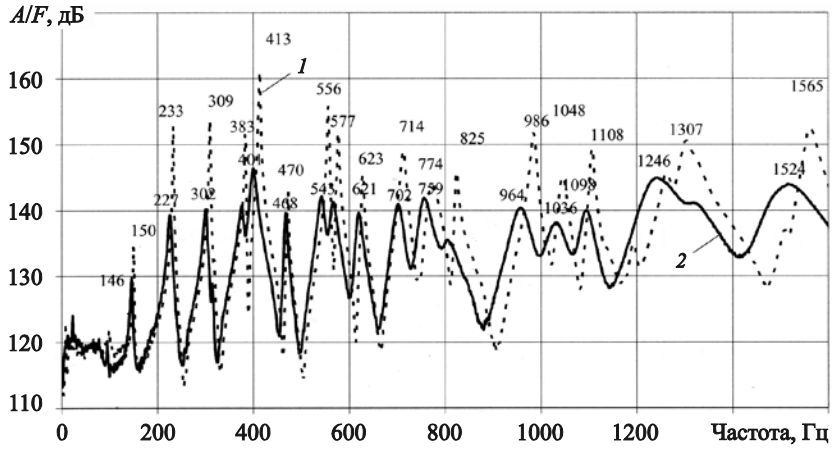

Рис. 3. Узкополосные спектры входной вибровозбудимости пластины с мягким вибропоглощающим покрытием (*1*) и с установленным в его воздушные полости армированным вибропоглощающим покрытием, состоящим из двух слоев полимерной пленки и армирующего стального листа толщиной 0,18 мм (*2*)

Fig. 3. Narrow-band spectra of the input vibration excitability for the plate damped by soft anti-vibration coating without dampers (*1*) and reinforced binary anti-vibration coating consisting of two polymeric film layers and reinforcing steel sheet of thickness 0.18 mm (*2*)

Все точки находились в зонах пучности низших форм резонансных изгибных колебаний пластины. Измерения выполнялись в частотном диапазоне 0–1600 Гц с полосой анализа 1 Гц.

Исследовалась эффективность размещения в воздушных полостях покрытия следующих дополнительных средств вибропоглощения:

- двух слоев полимерной пленки из поливинилацетата толщиной по 0,5 мм;
- армированного вибропоглощающего покрытия (АВП), содержащего два слоя указанной пленки и стальной лист толщиной 0,18 мм;
- АВП на основе одного слоя той же полимерной пленки и стального листа толщиной 0,5 мм.

Использовалась полимерная пленка марки ВПС-2,5 с температурным диапазоном наибольшей вибропоглощающей эффективности от 10 до 30 °С. Согласно работе [4] коэффициент потерь указанной пленки при соответствующих температурах находится в пределах значений от 1 до 3. Температура воздуха в лабораторном помещении, где проводились измерения, равнялась ~25 °С.

Размеры пленки и армирующих листов в плане соответствовали размерам воздушных полостей в покрытии. При всех вариантах заполнения верхний лист резины ВПП толщиной 1 мм размещался над дополнительным средством без воздушного зазора.

Заполнение воздушных полостей покрытия двумя слоями полимерной пленки привело к небольшому уменьшению уровней резонансных максимумов в спектрах входной вибровозбудимости пластины (в среднем по частотам и точкам измерения на 2–3 дБ). Значительный эффект был зарегистрирован лишь на двух высоких частотах (8 дБ – на частоте 2892 Гц и 5 дБ – на частоте 4551 Гц). На нескольких резонансных частотах заполнение воздушных полостей двумя слоями пленки привело к небольшому росту уровней входной вибровозбудимости пластины.

Дополнительное армирование двух слоев пленки стальным листом толщиной 0,18 мм привело к значительному уменьшению уровней практически всех резонансных максимумов в спектрах входной вибровозбудимости пластины. В качестве примера на рис. 3 приведены типичные спектры *A*/*F* пластины с ВПП при отсутствии и наличии в воздушных полостях соответствующего армированного покрытия. Его эффективность, усредненная по резонансным максимумам и точкам измерения, в диапазоне частот от 0 до 1600 Гц составила величину приблизительно 11 дБ. Примерно такая же эффективность данного типа армированного покрытия зарегистрирована и на более высоких резонансных частотах. Усредненное значение коэффициента потерь колебательной энергии в диапазоне частот от 0 до 1600 Гц оказалось равным 0,031.

Наибольшая эффективность уменьшения уровней резонансных максимумов вибровозбудимости пластины зарегистрирована при заполнении воздушных полостей армированным покрытием, содержащим один слой полимерной пленки с армирующим стальным листом такой же, как у нее, толщины (0,5 мм).

Эффективность заполнения воздушных полостей описанным покрытием, усредненная по точкам измерения и резонансным максимумам с наибольшими уровнями, по сравнению с ВПП, имеющим пустые полости, составила в диапазоне частот от 0 до 1600 Гц величину порядка 15 дБ (рис. 4). В сравнении с пластиной без ВПП средняя эффективность размещения в воздушных полостях рассматривае-

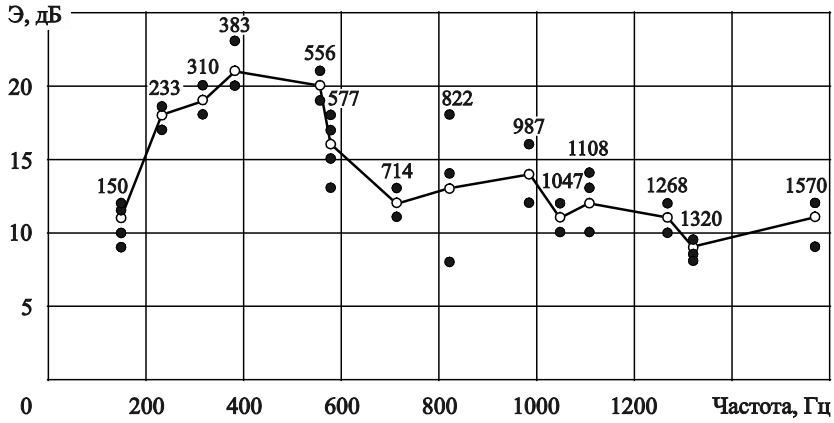

Рис. 4. Эффективность снижения вибровозбудимости пластины покрытием с воздушными полостями, заполненными армированным вибропоглощающим покрытием на основе стального листа толщиной 0,5 мм (кривая соответствует средним по точкам измерения значениям)

Fig. 4. Vibration damping efficiency of vibration damping tiles with air cavities filled with reinforced vibration damping coating based on steel sheet 0.5 mm thick (the curve corresponds to average measured values for corresponding points)

мого варианта армированного вибропоглощающего покрытия составила 23 дБ. При этом усредненное значение коэффициента потерь колебательной энергии пластины оказалось равным 0,055. Таким образом, применение ВПП с заполнением воздушных полостей одним слоем пленки с армирующим листом такой же, как у нее, толщины привело к росту коэффициента потерь пластины относительно ВПП с пустыми полостями примерно в 4 раза.

На завершающем этапе работы выполнены измерения эффективности находящихся непосредственно на поверхности пластины четырех листов армированного вибропоглощающего покрытия на основе пленки ВПС-2,5 и стального листа, имеющих одинаковую толщину 0,5 мм, с такими же размерами в плане, как у воздушных полостей испытанного ВПП. Результаты, с погрешностью измерений, совпали с ранее приведенными при нахождении такого же АВП в воздушных полостях мягкого покрытия.

К основным результатам выполненной работы отнесем следующие:

- проведен комплекс измерений эффективности мягкого ВПП из резины малой толщины с большими воздушными полостями при отсутствии и размещении в них дополнительных средств вибропоглощения на основе полимерной пленки из поливинилацетата, обладающего лучшим вибропоглощением среди существующих материалов;
- показано, что размещение в полостях только полимерной пленки к увеличению эффективности ВПП практически не приводит, а размещение там же армированного вибропоглощающего покрытия на основе той же пленки и тонкого (0,18 и 0,5 мм) стального листа увеличивает эффективность ВПП на среднюю, по резонансным максимумам и точкам измерения, величину 11–15 дБ.

Содержащиеся в статье результаты могут быть использованы при разработке мягких вибропоглощающих покрытий на основе резины с большим коэффициентом перфорации, а также при оценке их ожидаемой эффективности.

Авторы благодарят А.П. Старостина за помощь при подготовке моделей к испытаниям.

Список использованной литературы

1. *Никифоров А.С.* Акустическое проектирование судовых конструкций. Ленинград : Судостроение, 1990. 198, [1] с.
2. Экспериментальные исследования эффективности мягкого вибропоглощающего покрытия с большими воздушными полостями / *Кирпичников В.Ю., Смольников В.Ю., Старостин А.П., Олейников А.Ю.* // Noise Theory and Practice. 2024. Т. 10, № 4. С. 28–35.
3. *Кузьмичев М.Н.* Зависимость шумозаглушающей эффективности конструкции с покрытиями от их звукоизолирующих и отражающих свойств // Техническая акустика. 1994. Т. 3, № 1–2. С. 14–17.
4. *Алексеев С.А., Сятковский А.И.* Вибродемпфирующие свойства полимерных пленок // Судостроение. 2015. № 6. С. 45–46.

References

1. *Nikiforov A.* Acoustic design of ship structures. Leningrad : Sudostroenie, 1990. 198 p. (*in Russian*).
2. Effectiveness of soft vibration absorbing coating with large air cavity: experimental study / *V.Yu. Kirpichnikov, V.Yu. Smolnikov, A.P. Starostin, A.Yu. Oleynikov* // Noise Theory and Practice. 2024. Vol. 10, No. 4. C. 28–35 (*in Russian*).
3. *Kuzmichev M.* Noise damping efficiency of structures with acoustic coatings as function of their sound isola-

tion and sound reflection properties // Technical Acoustics. 1994. Vol. 3, No. 1–2. P. 14–17 (*in Russian*).

4. *Alexeev S.A.*, *Syatkovsky A.I.* Damping parameters of polymeric films // Sudostroenie (Shipbuilding). 2015. No. 6. P. 45–47 (*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.

Смольников Василий Юрьевич, ведущий инженер ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. E-mail: krylov@ksrc.ru.

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.), Lead Researcher, Deputy Head of Laboratory, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-49-85.

Vasiliy Yu. Smolnikov, Lead Engineer, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. E-mail: krylov@ksrc.ru.

Поступила / Received: 26.11.24
Принята в печать / Accepted: 14.02.25
© Кирпичников В.Ю., Савенко В.В., Смольников В.Ю., 2025