

УДК 629.12.037.1  
DOI: 10.37890/jwt.vi81.532

## **Эффективность применения эпоксидного компаунда без порошкового наполнителя для ремонта кавитационных повреждений гребных винтов**

**Ю. Н. Цветков**

*ORCID: 0000-0002-2089-1299*

**Я. О. Фиактистов**

*ORCID: 0000-0002-1800-5569*

**Р. Н. Ларин**

*ORCID: 0000-0002-5823-0154*

*Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, г. Санкт-Петербург*

**Аннотация.** Эпоксидные составы находят всё более широкое применение для ремонта гребных винтов, изношенных при кавитации. Подавляющее большинство эпоксидных ремонтных составов содержит в качестве наполнителей металлические порошки. Однако целесообразность использования порошковых наполнителей в эпоксидных составах для заделки очагов кавитационного износа на лопастях фирмами-изготовителями этих составов не обосновывается. А вопрос влияния металлических порошковых наполнителей на кавитационную износостойкость эпоксидного состава остаётся открытым. Испытания на ультразвуковом магнитострикционном вибраторе позволили сделать вывод, что эпоксидные ремонтные составы, содержащие металлический порошковый наполнитель — Devcon Bronze Putty и Devcon Titanium Putty, а также компаунд К-153 с добавками бронзового порошка — изнашиваются без инкубационного периода, т. е. потери массы образцов начинаются с первых минут кавитационного воздействия. При этом границы между металлическими частицами и эпоксидной матрицей служат очагами кавитационного разрушения, а процесс изнашивания протекает главным образом путём удаления металлических частиц из эпоксидной матрицы и последующего разрушения краёв образовавшихся пустот. Испытания эпоксидного компаунда К-153 без добавки бронзового порошка показали, что отказ от порошковых наполнителей приводит к изменению кинетики кавитационного изнашивания эпоксидного компаунда: на кинетической кривой изнашивания появляется инкубационный период, в течение которого отделение частиц износа с поверхности полимера практически отсутствует, а значит и качество поверхности почти не снижается. Применение для заделки очагов кавитационного износа на лопастях гребных винтов водоизмещающих судов эпоксидных ремонтных составов, не содержащих порошковых наполнителей, может привести к заметной экономии топлива. Это объясняется тем, что в течение инкубационного периода качество поверхности ремонтного состава почти не снижается, а значит, не снижается КПД движителя. Экономия может составить от 80 до 250 руб. на 1 кВт мощности судового дизеля за один междоковый период.

**Ключевые слова:** гребной винт, лопасть, кавитационный износ, КПД, эпоксидный ремонтный состав, бронзовый порошковый наполнитель, инкубационный период изнашивания, судового дизель, расход топлива.

## **Effectiveness of application of epoxy compound without powder filler to repair ship propellers damaged under cavitation**

**Yuriy N. Tsvetkov**

*ORCID: 0000-0002-2089-1299*

**Yaroslav O. Fiaktistov**

ORCID: 0000-0002-1800-5569

**Roman N. Larin**

ORCID: 0000-0002-5823-0154

*Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint-Petersburg*

**Abstract.** Epoxy compositions are wide-spread in repairing the ship propellers blades damaged under cavitation attack. Most of the epoxy repair compositions contain the metal powders as filler. But the manufacturers of such compositions do not substantiate the expediency of using the metal powder in epoxy compositions for repairing the blades with cavitation wear spots. And the issue of the influence of metal powder filler on the cavitation wear resistance of the epoxy composition remains open. Experiments on ultrasonic magnetostrictive rig allowed to draw the conclusion, that the epoxy compositions containing the metal powder filler — Devcon Bronze Putty and Devcon Titanium Putty, and also compound K-153 doped with bronze powder — wear out without incubation period, that is the material loss takes place from the very beginning of the cavitation attack. The boundaries between the metallic particles and the epoxy matrix are the spots of the cavitation damage onset, and the composition wears out by the way of metal particles removal and subsequent destruction of the formed voids edges. Testing the compound K-153 without metal powder filler showed that refusal to add the metallic powder filler into epoxy repair compounds leads to the change in kinetics of cavitation wear of epoxy compound: there the incubation period appears on the kinetic curve of wear, during the period the quality of the surface of epoxy does not deteriorate as the removal of wear particles from the epoxy surface is absent. The application of the epoxy compositions without metal powder filler to repair the cavitation wear zones on ship propellers blades can result in essential fuel saving. It is explained by that quality of the repair composition surface does not decrease significantly; hence the propeller efficiency does not decrease. The savings might amount from 80 to 250 rubles per 1kW of ship diesel power during each interval between dock repairs.

**Keywords:** ship propeller, blade, cavitation wear, efficiency, epoxy repair compound, bronze powder filler, incubation period, ship diesel, fuel consumption.

### **Введение**

Кавитационный износ гребных винтов (ГВ) является одной из самых распространённых причин их ремонта. Всё большее распространение для ремонта ГВ получают многочисленные полимерные составы на основе эпоксидных смол, такие как Belzona Супер XI-Металл, Chester Metal Ceramic FSL, Devcon<sup>8</sup>, K-15, УП-5-177, УП-5-177-1, Diamant Moglice, Weicon BR и др. Эпоксидные составы имеют много существенных преимуществ по сравнению с наплавкой, являющейся традиционным и самым распространённым способом ремонта изношенных ГВ. В частности, эпоксидные составы очень технологичны в применении, не оказывают в отличие от наплавки термического воздействия на металл лопасти и т. д. Поэтому их применение для ремонта ГВ водоизмещающих судов является обоснованным; на ГВ этих судов кавитационный износ возникает в концевых сечениях лопастей [1, 2], и при их ремонте приоритетом является не восстановление прочности лопасти, чего применением полимерных составов добиться не удастся, а восстановление качества поверхности, чтобы исключить отрицательное влияние очагов износа на КПД винта. Тем не менее, при всех преимуществах применения эпоксидных ремонтных составов их широкое использование при ремонте ГВ сдерживается их низкой долговечностью в условиях кавитации ГВ.

---

<sup>8</sup> Под маркой Devcon выпускается целая линейка ремонтных составов, включая перечень продуктов с наполнителями в виде металлических порошков (бронзовых, титановых, стальных, алюминиевых)

Можно выделить две основные причины низкой долговечности: плохая адгезия ремонтного состава к поверхности лопасти и его неудовлетворительная кавитационная износостойкость. Повышение адгезии полимеров к металлам — очень серьёзная проблема. Адгезионная способность полимеров, вследствие особенностей их строения, к металлическим поверхностям сравнительно низкая [3], и хотя составы на основе эпоксидных смол выгодно отличаются в этом плане от других полимеров [4, 5], тем не менее, адгезия даже эпоксидных составов далека от того уровня, который бы позволил технологии, основанной на их применении, вытеснить традиционную наплавку. Исследование вопросов адгезии требует отдельного серьёзного изучения, что выходит за рамки одной статьи. В представленной работе основное внимание уделено повышению кавитационной износостойкости эпоксидных ремонтных составов, и то, к какому экономическому эффекту это может привести.

Подавляющее большинство эпоксидных ремонтных составов содержит в качестве наполнителей металлические (бронзовые, титановые и др.) и керамические порошки. Например, из упомянутых выше, составы Belzona Супер XI-Металл, Chester Metal Ceramic FSL, Devcon, Diamant Moglice и Weicon BR содержат порошковые наполнители. Однако целесообразность использования порошковых наполнителей в эпоксидных составах для заделки очагов кавитационного износа на лопастях фирмами-изготовителями не обосновывается. А вопрос влияния металлических порошковых наполнителей на кавитационную износостойкость эпоксидного состава остаётся открытым.

Цель работы — оценка экономического эффекта от применения эпоксидного компаунда без металлического порошкового наполнителя для ремонта лопастей гребных винтов с очагами кавитационного износа.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- оценить влияние добавок металлического порошкового наполнителя на механизм кавитационного разрушения эпоксидного состава;
- провести сравнительный анализ кинетики кавитационного изнашивания эпоксидного компаунда с добавкой металлического порошкового наполнителя и без него;
- разработать методику оценки экономического эффекта при отказе от применения металлического порошкового наполнителя в эпоксидных ремонтных составах.

В рамках решения первых двух задач были проведены эксперименты на кавитационное изнашивание.

### **Методика эксперимента**

Эксперименты на кавитационное изнашивание проводили на алюминиевой бронзе, применяемой для изготовления гребных винтов, и эпоксидных составах, содержащих металлический порошковый наполнитель и не содержащих его.

В качестве бронз выбрали алюминиевую бронзу БрА9Ж4Н4Л. В качестве эпоксидных составов выбрали два импортных состава: Devcon Bronze Putty (Br) и Devcon Titanium Putty, первый содержал в качестве наполнителя бронзовый порошок, а второй — порошок титана, а также отечественный эпоксидный компаунд К-153 без наполнителя и с наполнителем в виде порошка алюминиевой бронзы БрАЖНМц9-4-4-1. Отверждение компаунда К-153 осуществляли добавкой отвердителя полиэтиленполиамина в количестве 12 частей по объёму и тщательным перемешиванием состава. Размер частиц в составах Devcon Br и Devcon Titanium Putty был около 19 и 22 мкм соответственно, а содержание частиц по объёму было около 20 % [6]. При этом, если в составе Devcon Titanium Putty частицы титана имели размеры, не сильно отличающиеся друг от друга в трёх измерениях, то в составе Devcon Br содержались бронзовые частицы двух фракций: окатанные и пластинчатые.

Бронзовый порошок для добавки в компаунд К-153 получали опиливанием прутка бронзы БрАЖНМц9-4-4-1 с применением напильников с разной насечкой. Размер и относительную долю металлических частиц в эпоксидном полимере определяли на микрошлифах, подготовленных из образцов эпоксидных составов, с помощью металлографического микроскопа, основываясь на принципиальных положениях стереометрической металлографии [7].

Опыты на кавитационное изнашивание проводили на ультразвуковом магнестрикционном вибраторе (МСВ) (рис. 1). Частота и амплитуда колебаний торца концентратора МСВ равнялась примерно 22 кГц и 28 мкм соответственно. Опыты проводили в пресной воде, температура которой поддерживалась в диапазоне  $20 \pm 3$  °С. Образцы 5 для испытаний имели форму цилиндров диаметром около 16 мм и высотой 10...12 мм. Образцы из бронзы БрА9Ж4Н4Л вытачивали из более крупных заготовок, вырезанных из ГВ, бывших в эксплуатации. Образцы составов Devcon получали заполнением чашечных образцов из бронзы БрАЖНМц9-4-4-1; диаметр внутренней полости равнялся 16 мм [6]. Образцы компаунда К-153 получали, заливая компаунд в трубчатые формы, нарезанные из металлопластиковой трубы, а после отверждения состава выдавливанием образца из формы. Испытываемые торцевые поверхности всех образцов шлифовали на шкурках разной зернистости, а потом поливали на влажном сукне. Испытывали по два образца каждого материала. Расстояние между испытываемой поверхностью образца и торцом колеблющегося концентратора 4 выставляли равным 0,5 мм. По результатам испытаний строили зависимости потерь массы образцов от продолжительности кавитационного воздействия. Для этого в процессе испытаний МСВ периодически выключали, образцы высушивали и взвешивали на аналитических весах с дискретностью показаний 0,1 мг.

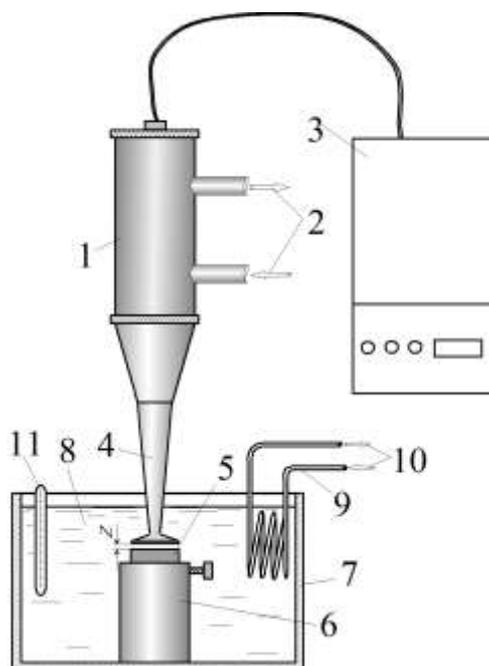


Рис.1. Схема ультразвукового магнестрикционного вибратора: 1 — магнестрикционный преобразователь; 2 — охлаждающая вода; 3 — ультразвуковой генератор; 4 — концентратор; 5 — образец; 6 — державка; 7 — ёмкость из оргстекла; 8 — вода; 9 — змеевик; 10 — охлаждающая вода; 11 — термометр

Также проводили механические испытания компаунда К-153 и испытания на адгезию компаунда к алюминиевой бронзе. Для проведения механических испытаний готовили заготовки компаунда заливкой его в трубчатые формы внутренним диаметром 40 и высотой 120 мм. После отверждения заготовки разрезали на более мелкие и вытачивали из них образцы (рис. 2а) по ГОСТ 11262-80. Испытания на одноосный разрыв проводили на машине МИМ.2-50. По результатам испытаний определяли предел прочности на разрыв. Испытали 4 образца, а за результат взяли среднее арифметическое.

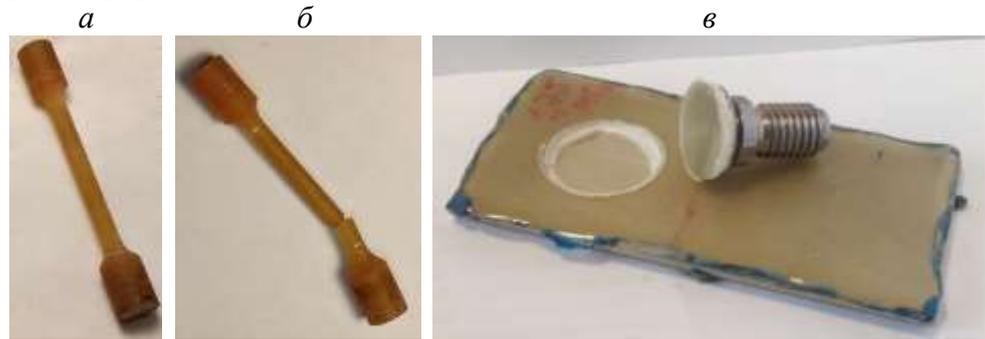


Рис.2. Вид образца из эпоксидного компаунда К-153 до (а) и после (б) испытаний на растяжение, а также оторванный грибок от эпоксидного покрытия в опытах на адгезию (в)

Испытания на адгезию проводили по схеме, регламентированной ГОСТ 32299-2013, путём отрыва стального грибка диаметром 19,5 мм, приклеенного к поверхности эпоксидного покрытия, нанесённого на пластину из бронзы БрАЖНМц9-4-4-1 (рис. 2 в), аналогичной по составу винтовой бронзе БрА9Ж4Н4Л. Средняя толщина покрытия равнялась 2,1 мм. Отрывали 6 грибков и регистрировали потребное для отрыва каждого грибка удельное усилие отрыва  $p_{отр}$  (МПа), а за окончательный результат взяли среднее значение.

#### **Анализ результатов опытов на кавитационное изнашивание**

Вид зависимостей потерь массы эпоксидных составов с металлическим порошковым наполнителем от продолжительности кавитационного воздействия (рис. 3) отличается от зависимостей, характерных для металлических материалов. Как видно на примере бронзы БрА9Ж4Н4Л (рис. 4 а), кавитационное изнашивание металлических сплавов характеризуется наличием инкубационного периода продолжительностью  $t_{инк}$ , т. е. периода, в течение которого потери массы практически отсутствуют, а идёт накопление повреждений в поверхностных слоях. Потери массы же эпоксидных составов с металлическим порошком начинаются с первых минут кавитационного воздействия (рис. 3), т. е. изнашивание идёт без инкубационного периода.

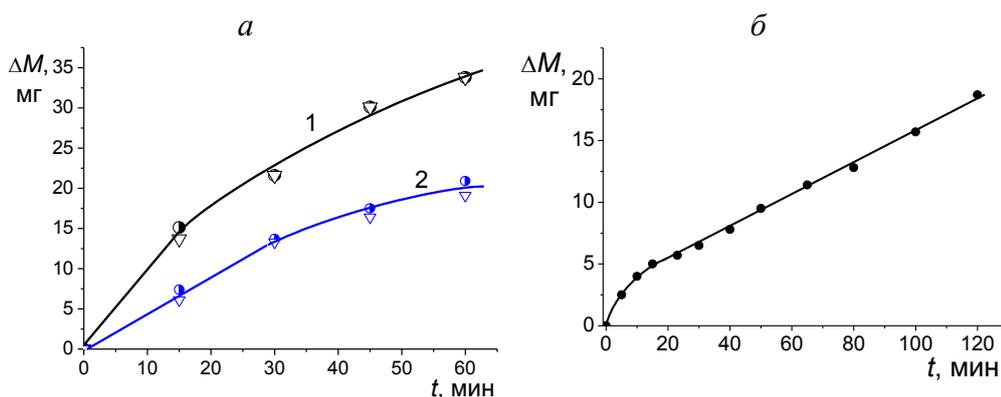


Рис.3. Кинетические кривые изнашивания составов Devcon (а) — Devcon Br (1) и Devcon Titanium Putty (2) — и компаунда К-152 (б), содержащего порошок алюминиевой бронзы с размером частиц около 18 мкм и их объемной долей в образце 9,5 %

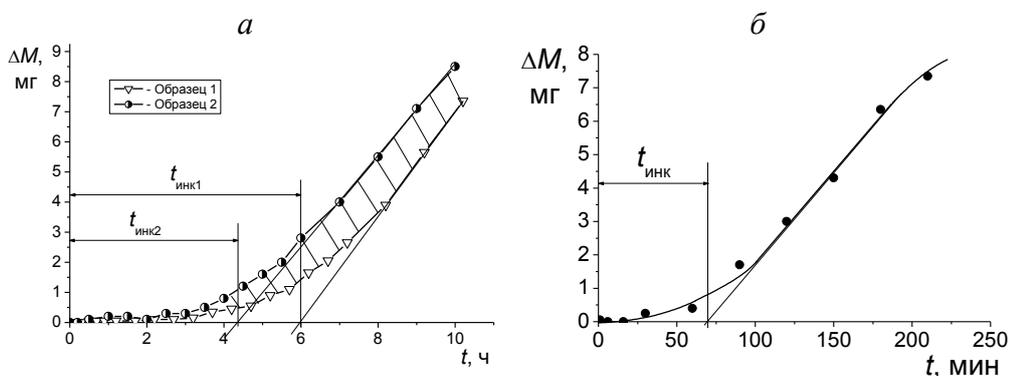


Рис.4. Зависимости кавитационного износа бронзы БрА9Ж4Н4Л (а) и эпоксидного компаунда К-153 без добавки порошкового наполнителя (б) от продолжительности кавитационного воздействия на МСВ

Интересно отметить, что обработка результатов испытаний составов Devcon (рис. 3 а) показала существование равенства [6]:

$$v_{BrP} / v_{TiP} \approx \rho_{Br} / \rho_{Ti}, \quad (1)$$

где  $\rho_{Ti}$  и  $\rho_{BrP}$  — плотности титана и бронзы, принятые соответственно равными 4,5 кг/м<sup>3</sup> и 8,4 кг/м<sup>3</sup>;  $v_{TiP}$  и  $v_{BrP}$  — скорости изнашивания составов Devcon Titanium Putty и Devcon Bronze Putty соответственно, равные 0,45 мг/мин и 0,96 мг/мин. Скорости изнашивания определили по углу наклона начального участка кривых  $\Delta M(t)$  на рис.3(а).

Существование приблизительного равенства (1) говорит о том, что кавитационное изнашивание эпоксидных составов с порошковым наполнителем происходит путём откалывания и вырыва металлических частиц из полимерной матрицы. Это подтверждается и анализом механизма разрушения эпоксидного компаунда К-153, содержащего частицы алюминиевой бронзы. Во время испытаний образец периодически помещали на предметный столик микроскопа и делали фотографию одного и того же района поверхности (рис. 5).

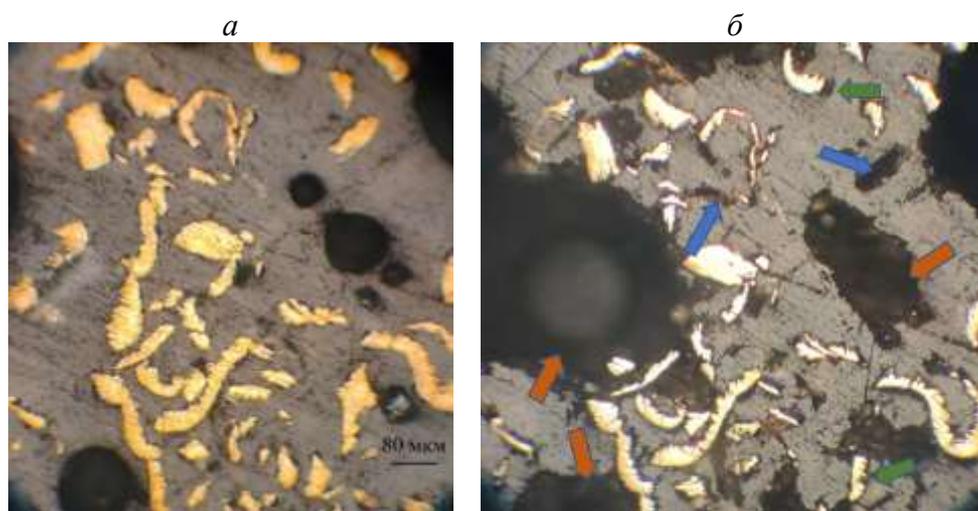


Рис.5. Образец компаунда К-153 с наполнителем из бронзовых частиц до испытаний (а) и после 45 мин испытаний (б): средний размер сечения частиц — 22 мкм; объёмная доля частиц — 15 %; синие стрелки — выколы частиц; красные — разбивка краёв пор; зелёные — разрушение полимера на границе металлических частиц и полимерной матрицы

Из фотографий на рис. 5 видно, что очагами разрушения поверхности являются границы раздела между бронзовыми частицами и эпоксидной матрицей (зелёные стрелки): именно с граничных районов начинается разрушение полимера, затем происходит выламывание бронзовых частиц из эпоксидной матрицы (синие стрелки) и последующие разбивка границ образовавшейся поры (красные стрелки).

То, что границы раздела являются слабым местом, подтверждается сравнением адгезионной и когезионной прочности эпоксидного компаунда К-153. В качестве характеристики адгезии эпоксидного компаунда использовали удельное усилие отрыва  $p_{отр}$  эпоксидного покрытия от бронзовой пластины, а в качестве когезионной прочности — предел прочности  $\sigma_b$  образца эпоксидного компаунда при одноосном растяжении (рис. 6).

Как видно из рис. 6, значение  $\sigma_b$  более, чем в 20 раз превышает значение  $p_{отр}$ . Очевидно, что эпоксидные полимеры, которые относятся к термореактивным полимерам и имеют после отверждения пространственную сетчатую структуру, при механическом воздействии будут разрушаться хрупко. Хрупкий характер разрушения эпоксидного полимера при кавитационном воздействии подтверждается в частности в работе [8]. В опытах на одноосное растяжение на разорванных образцах (рис. 2 б) также не было зарегистрировано ни шейки перед разрушением образца, ни общей остаточной деформации. Очевидно, что при хрупком разрушении эпоксидной матрицы использование порошкового наполнителя, адгезия которого к эпоксидной матрице более, чем на порядок ниже прочности самой эпоксидной матрицы, не может затормозить распространение трещин, а лишь ускорит процесс разрушения.

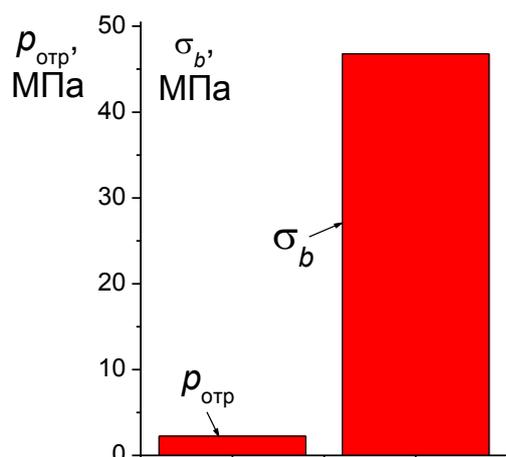


Рис.6. Сравнение значений удельной нагрузки  $p_{отр}$  на отрыв эпоксидного компаунда от бронзовой пластины и предела прочности  $\sigma_b$  эпоксидного компаунда К-153

Таким образом, введение металлического порошкового наполнителя в эпоксидные составы, используемые для ремонта кавитационных повреждений ГВ, является не только нецелесообразным, но и вредным, так как ухудшает кавитационную износостойкость эпоксидного компаунда. Были проведены испытания эпоксидного компаунда К-153 в исходном состоянии, т. е. без порошкового наполнителя. Следует отметить, что из-за того, что эпоксидные полимеры поглощают воду при испытаниях на кавитационное изнашивание, существует разница в методиках построения зависимости потерь массы наполненного и ненаполненного эпоксидных составов. Износ составов, содержащих металлический порошковый наполнитель, определяется отделением металлических частиц, и влиянием на результат взвешивания образцов поглощения воды эпоксидной матрицей можно пренебречь. При испытании составов без металлического наполнителя потери массы вследствие кавитационного воздействия очень малы, поэтому в результате водопоглощения в начале испытаний наблюдается прирост массы образцов, и требуется проводить корректирующие действия [9]. Построенная после корректировки зависимость  $\Delta M(t)$  представлена на рис. 4 (б). Как следует из рис. 4 (б), отказ от металлического порошкового наполнителя принципиально изменяет кинетику кавитационного изнашивания эпоксидного компаунда: появляется инкубационный период, и вид кривой  $\Delta M(t)$  для эпоксидного компаунда становится аналогичным виду кривой для металлических материалов (сравни рис. 4 а и б).

#### Оценка экономического эффекта от применения эпоксидных составов без порошковых наполнителей

Полученные результаты позволили рассчитать экономический эффект от применения для ремонта ГВ ненаполненного отечественного эпоксидного компаунда, например, К-153, вместо импортного эпоксидного состава, к примеру, Devcon BR, содержащего бронзовый порошок.

Расчёт проведём для условного судна, например, морского одновального судна водоизмещением 30 000 т, оснащённого четырёхлопастным ГВ диаметром  $D = 5300$  мм. Частота вращения ГВ  $n = 120$  об/мин. Материал ГВ — Al-Ni-бронза. Мощность главного двигателя  $N_e = 8000$  кВт. Удельный эффективный расход топлива  $g_e = 170$  г/(кВт·ч). На лопастях ГВ на относительных радиусах 0,9 обнаружены зоны кавитационных повреждений площадью (на всех четырёх лопастях)  $1800 \text{ см}^2$  и средней глубиной 5 мм, т. е. объём удалённого материала составляет около  $900 \text{ см}^3$ .

В общем случае экономический эффект от применения отечественного эпоксидного компаунда К-153 состоит из трёх составляющих:

$$\Delta Z = \Delta Z_1 + \Delta Z_2 + \Delta Z_3,$$

где  $\Delta Z_1$  — разница в стоимости импортного состава Devcon BR и отечественного эпоксидного компаунда К-153;  $\Delta Z_2$  — изменение стоимости выполнения технологических операций при ремонте с применением Devcon BR и отечественного эпоксидного компаунда К-153;  $\Delta Z_3$  — разница в затратах на топливо при изменении продолжительности инкубационного периода кавитационного изнашивания полимерного состава, нанесённого на лопасть ГВ.

Однако, по сути, экономический эффект определяется главным образом значением  $\Delta Z_3$ , это вызвано следующим: 1) значениями  $\Delta Z_1$  и  $\Delta Z_2$  по отдельности можно пренебречь по сравнению со значением  $\Delta Z_3$ ; 2) сумма  $\Delta Z_1 + \Delta Z_2 \rightarrow 0$ , так как выигрыш в стоимости от применения состава К-153 (стоимость К-153 примерно 1100 руб/кг, а состава Devcon BR — примерно 30 000 руб/кг) компенсируется большими затратами на выполнение технологических операций при использовании состава К-153 вследствие его более низкой технологичности: состав Devcon BR — паста, а компаунд К-153 — вязкая жидкость, поэтому при использовании К-153 нужно ограничить её растекание, например, созданием бортиков вокруг очага износа.

Экономия топлива при использовании эпоксидного состава без порошкового наполнителя определяется тем, что кавитационное изнашивание такого состава происходит с инкубационным периодом (рис. 7). Можно считать, что в течение инкубационного периода качество поверхности эпоксидного состава, нанесённого при ремонте на очаг кавитационного износа на лопасти, практически не снижается, а значит, и КПД винта не уменьшается; в то время, как износ ремонтного состава, содержащего порошковый наполнитель, начинается с первых минут эксплуатации, при этом КПД двигателя снижается. Значит, экономия топлива происходит в течение отрезка времени, равного продолжительности инкубационного периода. При этом полученная экономия топлива относится к одному междоковому периоду: инкубационный период в несколько раз короче междокового периода, и замена разрушенного эпоксидного покрытия на новое возможно только во время следующей постановки судна в док.

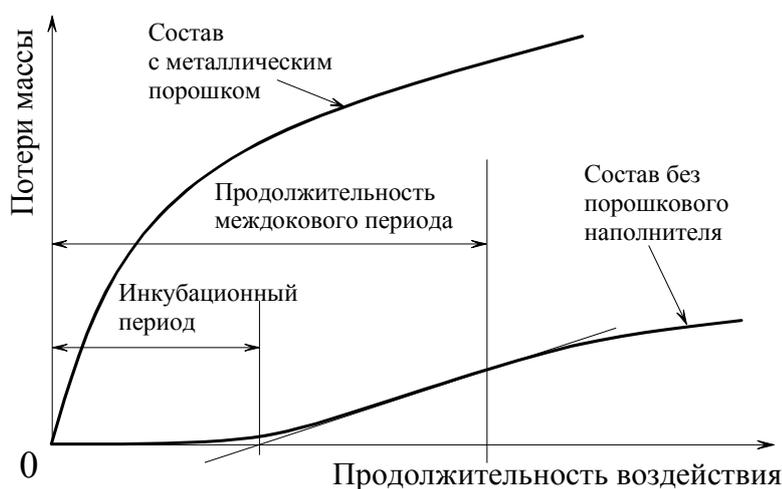


Рис.7. Схема, объясняющая положительный эффект от применения эпоксидных составов, не содержащих металлический порошковый наполнитель

Расчёт положительного эффекта от появления инкубационного периода проведём следующим образом. Линейная скорость вращения сечений лопастей на относительном радиусе 0,9 равна

$$v = \frac{0,9\pi n D}{60} = \frac{0,9 \cdot 3,14 \cdot 120 \cdot 5,3}{60} = 30 \text{ м/с.}$$

Продолжительность инкубационного периода кавитационного изнашивания бронзового ГВ найдём по зависимости  $t_{\text{инк}}(v)$  для бронзовых ГВ, представленной в монографии [2]. Получим, что для скорости 30 м/с продолжительность инкубационного периода будет равна 6000 ч.

Если сравнить рисунки 4(а) и 4(б), то видно, что продолжительность инкубационного периода кавитационного изнашивания эпоксидного компаунда примерно в 5 раз меньше продолжительности кавитационного изнашивания Al-Ni-бронза. Предположим, что такое же соотношение инкубационных периодов останется и для ГВ, тогда, если отремонтировать изношенные районы лопастей эпоксидным компаундом К-153, то для него продолжительность инкубационного периода составит  $6000/5 = 1200$  ч.

Таким образом, в течение  $t_{\text{инк}} = 1200$  ч лопасти, восстановленные компаундом без порошкового наполнителя, будут обеспечивать более высокий КПД винта по сравнению с теми же лопастями, но восстановленными эпоксидным составом с порошковым наполнителем, так как в последнем случае инкубационный период будет отсутствовать.

Расход топлива при работе главного двигателя в течение 1200 ч составит:

$$B = 0,001 t_{\text{инк}} g_e N_e = 0,001 \cdot 1200 \cdot 170 \cdot 8000 = 1632000 \text{ кг} = 1632 \text{ т.}$$

Вопрос влияния локальных участков грубого рельефа, расположенных в концевых районах лопастей ГВ, на КПД движителя не изучался, поэтому оценить точно влияние очагов кавитационного износа на КПД винта не представляется возможным. Известны работы [10, 11], посвящённые оценке влияния протяжённых зон грубого рельефа на лопастях, на КПД ГВ, основываясь на которых, можно предположить, что коэффициент момента винта снижается на 1–3 % при появлении в концевых сечении лопастей ГВ очагов износа. Примем для нашего условного судна с площадью очага износа на каждой лопасти  $1800/4 = 450 \text{ см}^2$ , что коэффициент момента ГВ снижается на 3 %. Так как судовой дизель работает по винтовой характеристике, то увеличение коэффициента момента на 3 % приводит к такому же увеличению потребляемой мощности дизеля для поддержания частоты вращения вала дизеля на прежнем уровне, а значит, количество потребляемого топлива увеличится, и его перерасход составит:

$$\Delta B = 0,03 B = 0,03 \cdot 1632000 \text{ кг} = 48,96 \text{ т.}$$

При стоимости топлива 40 000 руб/т экономия будет следующей:

$$\Delta \approx \Delta Z_3 = 48,96 \text{ т} \times 40 \text{ 000 руб/т} \approx 1 \text{ 958 000 руб.}$$

Этот экономический эффект относится к одному междоковому периоду, составляющему примерно 4 года. Чем короче междоковый период, тем больший экономический выигрыш приходится в среднем на один год эксплуатации судна.

Известно, что для ГВ произведение  $nD$  изменяется для разных судов в очень узких пределах, а поэтому для ГВ разных размеров концевые сечения лопастях на заданном относительном радиусе ГВ вращаются примерно с одинаковой скоростью. С учётом того, что расход топлива пропорционален мощности дизеля и увеличению коэффициент момента ГВ при появлении на лопастях очагов кавитационного износа, этот экономический эффект легко пересчитать на другие мощности главного двигателя и другие значения процентного увеличения коэффициента момента. В

графическом виде зависимость величины экономического эффекта от применения эпоксидных полимеров без металлического порошкового наполнителя от мощности главного двигателя и процентного увеличения коэффициента момента ГВ представлена на рис. 8.

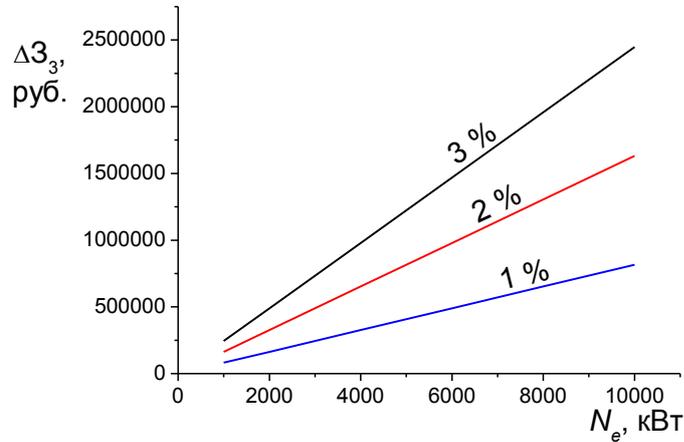


Рис.8. Экономический эффект от применения эпоксидного компаунда без добавок металлического порошкового наполнителя в зависимости от мощности главного двигателя и величины увеличения коэффициента момента ГВ (показаны в процентах на поле рисунка)

В приведённом выше расчёте экономического эффекта не учитывали важнейший фактор, влияющий на долговечность компаунда — адгезию, о которой уже упоминалось во введении. В статье [12] показано, что воздействие на поверхность лопастей при кавитации ГВ происходит ударными струями, образующимися при схлопывании кавитационных каверн, при этом струи направлены под углом к поверхности, а их скорость существенно превышает 400 м/с. Когда струя ударяет под углом, то скорость растекания струи по поверхности многократно превышает скорость самого удара [13], и в этом случае при растекании струя успевает до полного смыкания каверны пройти расстояние вдоль поверхности, соизмеримое с протяжённостью очага износа. При движении воды с такими скоростями вдоль поверхности, на поверхности эпоксидного состава, которым отремонтировали изношенную поверхность, возникают значительные касательные напряжения, а поэтому все дефекты, выходящие на поверхность — микротрещины, микропоры, границы раздела фаз и т. п. — будут являться очагами разрушения.

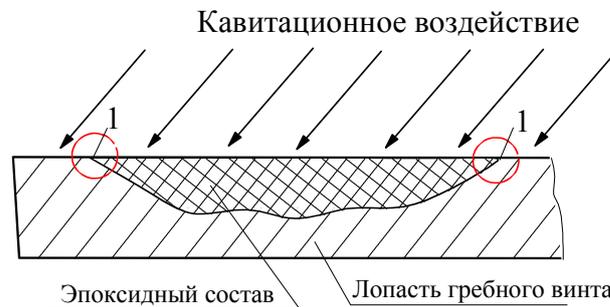


Рис.9. Схема кавитационного воздействия на участок изношенной при кавитации лопасти, отремонтированный с применением эпоксидного состава. Кругами обведена граница раздела эпоксидного компаунда и металла лопасти, выходящая на поверхность

Вот почему применяемые эпоксидные составы должны быть гомогенными и не содержать порошкового наполнителя. Тем не менее, даже при применении гомогенных эпоксидных составов не удастся избежать появления границ 1 раздела между эпоксидным составом и металлом лопасти (рис. 9), выходящих на поверхность лопасти, так как очаг кавитационного износа носит локальный характер. Выход границ 1 раздела между эпоксидным составом и металлом лопасти (рис. 9) на поверхность лопасти может привести к тому, что вследствие неудовлетворительной адгезии на границе 1 начнётся кавитационное разрушение эпоксидного компаунда существенно раньше, чем на поверхности самого эпоксидного компаунда в центральной части эпоксидной заделки. И, как следствие, начнётся отделение крупных участков покрытия от поверхности лопасти, хотя на самом покрытии следы кавитационного повреждения будут ещё отсутствовать. Поэтому наряду с увеличением кавитационной износостойкости полимерных ремонтных составов надо уделять ещё более серьёзное внимание вопросу их адгезии к материалу лопастей.

### **Заключение**

Большинство эпоксидных составов, применяемых для ремонта лопастей ГВ, изношенных при кавитации, содержит металлический порошковый наполнитель. Присутствие металлических частиц в эпоксидной матрице отрицательно влияет на кавитационную износостойкость композита. Границы раздела между металлическими частицами и эпоксидной матрицей служат очагами кавитационного разрушения. Кавитационную изнашивание протекает путём выламывания металлических частиц из эпоксидной матрицы и последующего разрушения краёв образовавшихся пор. Отказ от применения металлических порошковых наполнителей в эпоксидных ремонтных составах позволяет принципиально изменить кинетику кавитационного изнашивания эпоксидного компаунда: появляется инкубационный период, в течение которого потери массы полимера практически отсутствуют. В течение инкубационного периода качество поверхности ремонтного состава на поверхности лопасти почти не снижается, а значит, не снижается КПД судового движителя, т. е. расход топлива не увеличивается. Экономия денежных средств за счёт экономии топлива при использовании ремонтных эпоксидных составов без наполнителей в виде металлических порошков, составляет от 80 до 250 руб. на каждый кВт мощности судового дизеля за один междоковый период.

### **Список литературы**

1. Георгиевская, Е. П. Кавитационная эрозия гребных винтов и методы борьбы с ней / Е. П. Георгиевская — Л.: Судостроение, 1978. — 208 с.
2. Цветков, Ю. Н. Кавитационное изнашивание металлов и оборудования / Ю. Н. Цветков — СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. — 155 с.
3. Awaja, F. Adhesion of polymers / F. Awaja, M. Gilbert, G. Kelly, B. Fox, P. Pigram // *Progress in Polymer Science*. — 2009. — 34(9). — P. 948–968. <https://doi:10.1016/j.progpolymsci.2009.04.007>.
4. Schmidt, R. Epoxy adhesion to metals / R. Schmidt, J. Bell // *Advances in Polymer Science*. — 1986. — P. 33–71. <https://doi: 10.1007/BFb0017914>.
5. Чурсова, Л. В. Эпоксидные смолы, отвердители. Модификаторы и связующие на их основе / Л. В. Чурсова, Н. Н. Панина, Т. А. Гребенева, И. Ю. Кутергина. — СПб.: ЦОП «Профессия». — 2020. — 576 с.
6. Фиактистов, Я. О. Кавитационная износостойкость полимерных составов с металлическим наполнителем / Я. О. Фиактистов, Ю. Н. Цветков // 65-я Международная научная конференция Астраханского государственного технического университета, Астрахань, 26–30 апреля 2021 г., С.857–862 [Электронный ресурс]: материалы / Астрахан. гос. техн. ун-т. — Астрахань: Изд-во АГТУ, 2021. Режим доступа: <http://astu.org/Content/Page/5833>.

7. Салтыков, С. А. Стереометрическая металлография / С. А. Салтыков. — М.: Металлургия, 1976. — 271 с.
8. Deng, W. Influence of epoxy resin on the microstructure and cavitation erosion of as-sprayed 8YSZ coating / W. Deng, X. Zhao, E. Hao, J. Han, Y. An, H. Zhou, J. Chen // *Ceramics International*. — 2019. — Vol. 45. — Issue 5. — P. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.12.034>.
9. Цветков, Ю. Н. Определение продолжительности инкубационного периода полимеров при кавитационном изнашивании методом профилометрии / Ю. Н. Цветков, Я. О. Фиактистов // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. — 2023. — Т. 89. — № 5. — С. 64–70. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-5-64-70>.
10. Кацман, Ф. М. Эксплуатация пропульсивного комплекса морского судна / Ф. М. Кацман — М.: Транспорт, 1987. — 223 с.
11. Пустошный, А. В. Влияние шероховатости поверхности гребного винта на его пропульсивные характеристики / А. В. Пустошный, А. В. Сверчков, С. П. Шевцов // *Труды Крыловского государственного научного центра*. — 2019. — Т. 4. — № 390. — С. 11–26. <https://doi.org/10.24937/2542-2324-2019-4-390-11-26>.
12. Цветков, Ю. Н. Анализ геометрии вмятин на поверхности лопастей гребных винтов при кавитационном изнашивании / Ю. Н. Цветков, Е. О. Горбаченко, Я. О. Фиактистов // *Трение и износ*. — 2021. — Т. 42. — № 1. — С. 33–41. <https://doi.org/10.32864/0202-4977-2021-42-1-33-41>.
13. Brunton, J. H. Cavitation phenomena / J. H. Brunton // *Proceedings of the Third International Conference on Rain Erosion and Associated Phenomena, Elvetham Hall, 11–13 August, Royal Aircraft Establishment (Great Britain)*. — 1970. — Vol. 2. — P. 433–450.

#### References

1. Georgievskaya E. P. Kavitatsionnaya eroziya grebnyh vintov i metody bor'by s ney. L.: Sudostroyeniye, 1978. 208 p. (In Russ).
2. Tsvetkov Y. N. Kavitatsionnoye iznashivaniye metallov i oborudovaniya. SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2003. 155 p. (In Russ).
3. Awaja, F., Gilbert, M., Kelly, G., Fox, B., Pigram, P. Adhesion of polymers // *Progress in Polymer Science*. 2009. 34(9). pp. 948–968. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2009.04.007>.
4. Schmidt R., Bell J. Epoxy adhesion to metals // *Advances in Polymer Science*. 1986. P. 33–71. <https://doi.org/10.1007/BFb0017914>.
5. Chursova, L. V., Panina, N. N., Grebeneva, T. A., Kutergina, I. Y. Epoksidniye smoly, otverditeli. Modifikatory i sviyazuyushiye na ih osnove. SPb.: TsOP «Professiya», 2020. 576 p.
6. Fiaktistov Y. O., Tsvetkov Y. N. Kavitatsionnaya iznosostoykost' polimernykh sostavov s metallcheskim napolnitelem // 65th Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya Astrahanskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta, Astrahan', 26–30 aprelya 2021., pp. 857–862. —Astrahan': Izd-vo AGTU, 2021. <http://astu.org/Content/Page/5833>. (In Russ).
7. Saltykov S. A. Stereometricheskaya metallografiya. M.: Metallurgiya, 1976. 271 p. (In Russ).
8. Deng, W. Influence of epoxy resin on the microstructure and cavitation erosion of as-sprayed 8YSZ coating / W. Deng, X. Zhao, E. Hao, J. Han, Y. An, H. Zhou, J. Chen // *Ceramics International*. 2019. Vol. 45. Issue 5. P. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.12.034>.
9. Tsvetkov, Y.N., Fiaktistov, Y.O. Evaluation of the incubation period of polymers in cavitation wear by the method of profilometry // *Industrial Laboratory. Materials Diagnostics*; 2023. Vol. 89. No.5. pp. 64–70. (In Russ). <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-5-64-70>.
10. Katsman F. M. Ekspluatatsiya propulsivnogo kompleksa morskogo sudna. M.: Transport, 1987, 223 p. (In Russ).
11. Pustoshniy, A. V., A. V. Sverchkov, S. P. Shevtsov. “Vliyaniye sheroховatosti poverhnosti grebnogo vinta na ego propulsivniye harakteristiki”. *Trudy Krilovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra*. 2019. 390(4). pp. 11–26. (In Russ). <https://doi.org/10.24937/2542-2324-2019-4-390-11-26>.

12. Tsvetkov Y. N., Gorbachenko E. O., Fiaktistov Ya. O. Analysis of the Geometry of Dents on a Propeller Blade Surface during Cavitation Wear // Journal of Friction and Wear. 2021. Vol. 42. No. 1. pp. 17–22. [https://doi: 10.32864/0202-4977-2021-42-1-33-41](https://doi.org/10.32864/0202-4977-2021-42-1-33-41).
13. Brunton, J. H. Cavitation phenomena / J. H. Brunton // Proceedings of the Third International Conference on Rain Erosion and Associated Phenomena, Elvetham Hall, 11–13 August, Royal Aircraft Establishment (Great Britain). 1970. Vol. 2. pp. 433–450.

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Цветков Юрий Николаевич** – доктор технических наук, профессор; заведующий кафедрой технологии судоремонта, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова» (ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова), 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, д. 5/7; кафедра ТС; ГУМРФ; e-mail: [yuritsvet@mail.ru](mailto:yuritsvet@mail.ru)

**Фиактистов Ярослав Олегович** – старший преподаватель кафедры технологии судоремонта, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова» (ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова), 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, д. 5/7; кафедра ТС; ГУМРФ; e-mail: [yaroslav3373@mail.com](mailto:yaroslav3373@mail.com)

**Ларин Роман Николаевич**, к.т.н., доцент кафедры технологии судоремонта, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова» (ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»), 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, д. 5/7; e-mail: [npo.albatros@gmail.com](mailto:npo.albatros@gmail.com)

**Yuriy N. Tsvetkov** – doctor of engineering science, professor, head of ship repair subdepartment, Federal State-Financed Educational Institution of Higher Education « Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping» (Admiral Makarov SUMIS), d. 5/7, ul. Dvinskaya, Saint-Petersburg, 198035

**Yaroslav O. Fiaktistov** – senior lecturer of ship repair subdepartment, Federal State-Financed Educational Institution of Higher Education « Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping» (Admiral Makarov SUMIS), d. 5/7, ul. Dvinskaya, Saint-Petersburg, 198035

**Roman N. Larin** - Associate Professor; PhD in Engineering Science; Federal State-Financed Educational Institution of Higher Education «Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping»; 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation

Статья поступила в редакцию 02.07.2024; опубликована онлайн 20.12.2024.  
Received 02.07.2024; published online 20.12.2024.