

## СУДОСТРОЕНИЕ, СУДОРЕМОНТ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ФЛОТА SHIPBUILDING, SHIP REPAIR AND FLEET OPERATION

Научная статья  
УДК 629.12;33.12;233.2  
<https://doi.org/10.24143/2073-1574-2026-1-7-18>  
EDN EPRLKD

### Сравнительный анализ трибологических характеристик материалов дейдвудных подшипников при работе по схеме обратной и прямой пары трения

**Юрий Николаевич Цветков<sup>1✉</sup>, Арина Станиславовна Светловская<sup>2</sup>,  
Дмитрий Викторович Третьяков<sup>3</sup>, Сергей Геннадьевич Баранов<sup>4</sup>**

<sup>1, 3, 4</sup> Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова,  
Санкт-Петербург, Россия, [yuritsvet@mail.ru](mailto:yuritsvet@mail.ru)✉

<sup>2</sup> ООО «СпецМорСервис»,  
Санкт-Петербург, Россия

**Аннотация.** Проведен сравнительный анализ трибологических характеристик сопряжения «материал облицовки гребного вала – капролон» при работе по схемам прямой и обратной пары трения в условиях граничной смазки при смазывании пресной водой. Испытания проводили на машине трения МИ-1 по схеме «вращающийся ролик – неподвижное кольцо». При испытании прямой пары трения ролики изготавливались из капролона, а кольца из нержавеющей аустенитной стали и оловянистой бронзы БрО5Ц5С5; при испытании обратной пары, наоборот, ролики – из металлического материала, а кольца – из капролона. Смазывание водой осуществляли частичным погружением ролика в ванночку с водой в сочетании со струйной подачей воды в зону трения. Вода подавалась по замкнутому циклу: из ванночки стекала в емкость объемом 10 л и погружным насосом подавалась струей в зону трения. Часть воды постоянно отбиралась из емкости и пропусклась через охлаждающее устройство, что позволяло поддерживать температуры воды в постоянном диапазоне  $20 \pm 3$  °С. Независимо от того, по какой схеме работает сопряжение, шероховатость металлического контртела практически не изменяется, а значения высотного параметра шероховатости капролона изменяются очень сильно и приближаются к значениям параметра шероховатости металла. Переход от схемы обратной пары к схеме прямой пары трения приводит при прочих равных условиях к увеличению давления в зоне контакта почти в три раза, что ухудшает условия для существования пленки воды на поверхности трения. Последнее обстоятельство в сочетании с особенностями приработки элементов пары трения «сплав облицовки – капролон» приводит к тому, что в прямой паре трения увеличивается доля деформационной составляющей трения. Сделан вывод о том, что в прямых парах по сравнению с обратными парами кратно увеличиваются износ капролонового элемента и коэффициент трения.

**Ключевые слова:** дейдвудный подшипник, капролон, оловянистая бронза, нержавеющая сталь, пресная вода, прямая пара трения, обратная пара трения, коэффициент трения, скорость изнашивания, шероховатость, краевой угол смачивания

**Для цитирования:** Цветков Ю. Н., Светловская А. С., Третьяков Д. В., Баранов С. Г. Сравнительный анализ трибологических характеристик материалов дейдвудных подшипников при работе по схеме обратной и прямой пары трения // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2026. № 1. С. 7–18. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2026-1-7-18>. EDN EPRLKD.

Original article

## Comparative analysis of tribological characteristics of stern-tube bearing materials working by the scheme of a direct and an opposite friction pair

Yuriy N. Tsvetkov<sup>1✉</sup>, Arina S. Svetlovskaya<sup>2</sup>, Dmitriy V. Tretyakov<sup>3</sup>, Sergey G. Baranov<sup>4</sup>

<sup>1,3,4</sup>Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,  
Saint Petersburg, Russia, yuritsvet@mail.ru✉

<sup>2</sup>SpetsMorServis LLC,  
Saint Petersburg, Russia

**Abstract.** A comparative analysis of the tribological characteristics of the coupling “propeller shaft lining material – nylon” was carried out when working according to the schemes of the forward and reverse friction pairs under conditions of boundary lubrication when lubricated with fresh water. The tests were carried out on the MI-1 friction machine according to the “rotating roller – fixed ring” scheme. When testing the direct friction pair, the rollers were made of nylon, and the rings were made of stainless austenitic steel and tin bronze BrO5Ts5S5; when testing the reverse pair, on the contrary, the rollers were made of metal material, and the rings were made of nylon. Water lubrication was carried out by partially immersing the roller in a tub of water in combination with jet water supply to the friction zone. The water was supplied in a closed cycle: water flowed from the tub into a 10-liter container and was pumped by a submersible pump into the friction zone. Part of the water was constantly taken from the tank and passed through a cooling device, which made it possible to maintain water temperatures in a constant range of  $20 \pm 3$  °C. Regardless of the coupling scheme, the roughness of the metal counterbody practically does not change, and the values of the height parameter of the nylon roughness change very much and approach the values of the metal roughness parameter. The transition from the reverse pair scheme to the direct friction pair scheme leads, all other things being equal, to an increase in pressure in the contact zone by almost three times, which worsens the conditions for the existence of a film of water on the friction surface. The latter circumstance, combined with the peculiarities of working out the elements of the friction pair “propeller shaft lining alloy – nylon”, leads to the fact that the proportion of the deformation component of friction increases in the direct friction pair. It is concluded that in direct pairs, compared with reverse pairs, the wear of the nylon element and the coefficient of friction increase many times.

**Keywords:** stern-tube bearing, polyamide, tin bronze, stainless steel, fresh water, direct friction pair, opposite friction pair, friction coefficient, wear rate, roughness of surface, contact angle

**For citation:** Tsvetkov Yu. N., Svetlovskaya A. S., Tretyakov D. V., Baranov S. G. Comparative analysis of tribological characteristics of stern-tube bearing materials working by the scheme of a direct and an opposite friction pair. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies.* 2026;1:7-18. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2026-1-7-18>. EDN EPRLKD.

### Введение

Вопрос обеспечения надежности дейдвудных подшипников, смазываемых водой, является очень актуальным: выход из строя дейдвудного подшипника приводит к невозможности эксплуатации судна и часто к аварийной ситуации [1]. По данным Российского морского регистра судоходства, количество отказов дейдвудных подшипников, смазываемых водой, преобладает среди отказов элементов судового движительного комплекса [2]. Дейдвудные подшипники, смазываемые водой, уступают по многим эксплуатационным характеристикам дейдвудным подшипникам, смазываемым маслом [3], в частности они имеют более высокое трение, и основная причина выхода из строя дейдвудных подшипников, смазываемых водой, – повышенный износ. Однако постоянно ужесточающиеся экологические требования способствуют все более широкому применению неметаллических дейдвудных подшипников, смазываемых водой,

и проведению исследований по разработке новых материалов для таких подшипников [4, 5]. До сих пор, согласно статистике, самым распространенным материалом для изготовления дейдвудных подшипников, смазываемых водой, является капролон. Из-за веса гребного винта кормовой участок кормовых капролоновых дейдвудных подшипников интенсивно изнашивается, что приводит к смещению в нос точки опоры гребного вала на кормовой дейдвудный подшипник и, как следствие, увеличению длины консоли и снижению частоты собственных колебаний гребного вала, что может привести к резонансным колебаниям гребного вала [6].

Известно, что одни и те же материалы в конкретном трибосопряжении можно сочетать по схемам прямой и обратной пары трения [7], деление на которые определяется соотношением твердости и площадей поверхности трения элементов пары трения. Как правило, обратные пары трения отличаются более высокой надежностью в эксплуатации, однако

и прямые пары нередко применяются в технике.

Пара трения «капролоновый дейдвудный подшипник – бронзовая или стальная облицовка гребного вала» – типичный пример обратной пары трения. В работе [8] в качестве мероприятия по снижению износа в сопряжении дейдвудного подшипника с облицовкой вала, смазываемого водой, предложили использовать прямые пары трения (понятия прямой и обратной пар трения используются в соответствии с определениями, приведенными в трудах Д. Н. Гаркунова), т. е. предложено изготавливать облицовки гребных валов из капролона, а дейдвудный подшипник – из оловянистой бронзы БрО10Ц2 или нержавеющей стали типа Х18Н9Т. Проблему ослабления натяга между капролоновой облицовкой и шейкой гребного вала предложено решать применением в соединении специально разработанного клеевого состава. Опыт эксплуатации капролоновой облицовки на буксирном судне в течение 2 тыс. ч показал положительные результаты, и, по утверждению авторов, капролоновая облицовка сохранила свое положение на гребном валу, а зазор в дейдвудном подшипнике практически не изменился. Тем не менее не были приведены численные значения зазора (исходного и после эксплуатации) и, естественно, не исследовался вопрос влияния на трибологические характеристики сопряжения при пе-

реходе от обратной к прямой паре трения.

В статье [9] сделана попытка исследования прямых и обратных пар трения в сопряжении «бронза – капролон», однако эти эксперименты нельзя назвать полными, т. к. в них не учитывалась кинетика изменения коэффициента трения в прямых и обратных парах трения, а эксперименты были проведены только для сопряжения «оловянистая бронза – капролон».

*Цель работы* – оценка целесообразности перехода в дейдвудных подшипниках от схемы обратной к схеме прямой пары трения.

### Методика эксперимента

Опыты проводили на модернизированной машине трения – МИ-1 (рис. 1). Сопряжение облицовки гребного вала и дейдвудного подшипника имитировалось парой трения «ролик – кольцо» при частоте вращения ролика  $n = 200$  об/мин. Осуществлялось комбинированное смазывание, реализуемое частичным погружением вращающегося ролика в ванночку с водой в сочетании со струйной подачей мягкой пресной воды в зону трения. Воду подавали по замкнутому контуру погружным насосом из емкости объемом 10 л; часть воды для поддержания ее температуры в диапазоне  $20 \pm 3$  °С пропускали с помощью того же насоса через блок охлаждения.

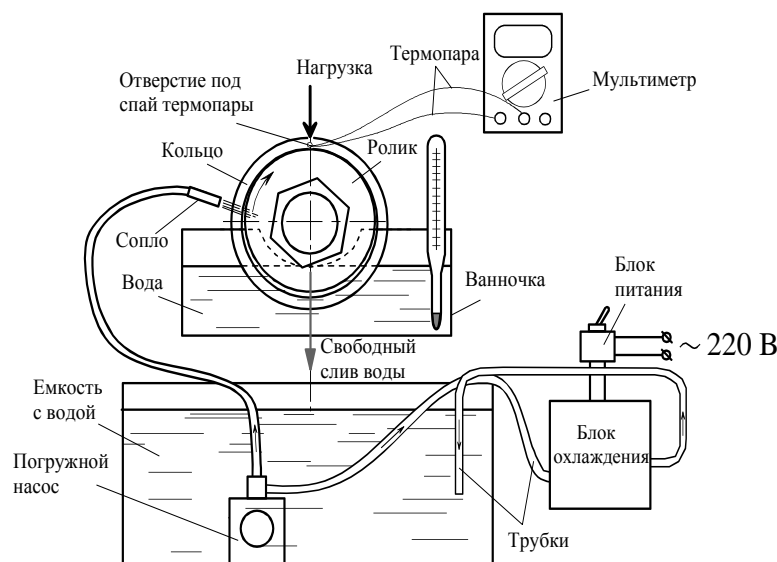


Рис. 1. Схема эксперимента

Fig. 1. Experimental scheme

Общий вид, размеры и материалы элементов пары трения представлены на рис. 2 и в табл. 1. В ходе испытания сочетания бронзы БрО5Ц5С5 с капролоном провели только одну серию опытов при нагрузке на пару трения  $F_N = 588$  Н. При испытании сочетания нержавеющей стали с капроло-

ном провели три серии опытов при нагрузках на пару трения  $F_N = 588, 392$  и  $196$  Н.

При каждой нагрузке и прямую, и обратную пару трения испытывали по три раза, а за окончательный результат брали среднее арифметическое полученных результатов в трех параллельных опытах.

Цветков Ю. Н., Светловская А. С., Третьяков Д. В., Баранов С. Г. Сравнительный анализ трибологических характеристик материалов действующих подшипников при работе по схеме обратной и прямой пары трения



Рис. 2. Фото обратных (а) и прямых (б) пар трения: слева на каждом фото – сопряжения нержавеющей стали и капролона, справа – оловянистой бронзы и капролона

Fig. 2. Photos of reverse (a) and forward (b) friction pairs: on the left in each photo are stainless steel and nylon couplings, on the right – tin bronze and nylon couplings

Таблица 1

Table 1

Характеристики испытанных пар трения

Characteristics of the tested friction pairs

Пара трения	Вращающийся ролик		Неподвижное кольцо	
	Материал	Размеры, мм	Материал	Форма и размеры, мм
Обратная	БрО5Ц5С5	Диаметр – 49,90; ширина – 12,10	Капролон	Внутренний диаметр – 50,96; ширина – 12,0
Прямая	Капролон	Диаметр – 49,94; ширина – 12,04	БрО5Ц5С5	Внутренний диаметр – 50,62; ширина – 12,0
Обратная	12Х18Н10Т	Диаметр – 49,1; ширина – 12,1	Капролон	Внутренний диаметр – 51,0; ширина – 12,04
Прямая	Капролон	Диаметр – 49,94; ширина – 12,04	17Х18Н9	Внутренний диаметр – 50,50; ширина – 12,08

Перед каждым параллельным опытом поверхность трения роликов перешлифовывалась, чтобы обеспечить примерно одинаковую исходную шероховатость, а кольцевой образец поворачивали на некоторый угол, чтобы в следующем опыте контакт приходился на «свежее» место.

До и после испытаний измеряли шероховатость поверхности трения роликов и колец, а также взвешиванием определяли их износ по потерям массы.

**Испытания сопряжения оловянистой бронзы и капролона**

Изменение коэффициента трения с течением времени испытаний показано на рис. 3. Если приработка обратной пары имеет выраженный характер: коэффициент трения повышается, а потом снижается почти в 5 раз и стабилизируется, то в прямой паре приработка отсутствует. При этом скорость изнашивания капролонового элемента сопряжения при переходе от обратной к прямой паре трения увеличивается на два порядка (рис. 4).

Варьирование нагрузки на пару трения после

приработки при 588 Н показала схожий характер закономерностей коэффициента и силы трения от нагрузки (рис. 5), тем не менее отмеченное соотношение коэффициентов трения остается примерно постоянным во всем диапазоне нагрузок (рис. 5, а).

Зависимости  $T(F_N)$  имеют линейный характер (рис. 5, б), экстраполяция которых до значений силы трения  $T = 0$  позволила получить значения сил адгезии  $F_a$ , действующих между поверхностями трения: для обратной пары трения  $F_a \approx 1\,800$  Н, а для прямой  $F_a \approx 200$  Н.

Измерение шероховатости элементов пары трения до и после испытаний (рис. 6) подтвердило, что сумма значений параметров  $R_a$  для обратной пары составляет примерно 0,46 мкм, а для прямой – 3,5 мкм, т. е. почти на порядок больше. В сравнении с минеральными маслами молекулы воды обладают существенно меньшими размерами и иной пространственной структурой, а поэтому шероховатость поверхности трения играет большую роль в сохранении пленки воды на поверхности трения.

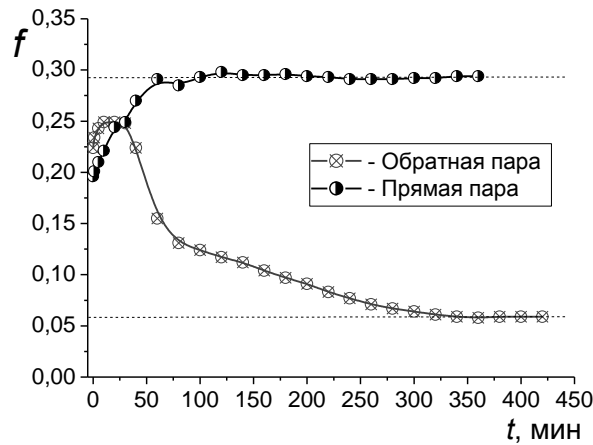


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения бронзы БрО5Ц5С5 по капролону в прямых и обратных парах от продолжительности испытаний при нагрузке 588 Н

Fig. 3. Dependence of the coefficient of friction of bronze BrO5Ts5S5 on nylon in forward and reverse pairs on the duration of tests at a load of 588 Н

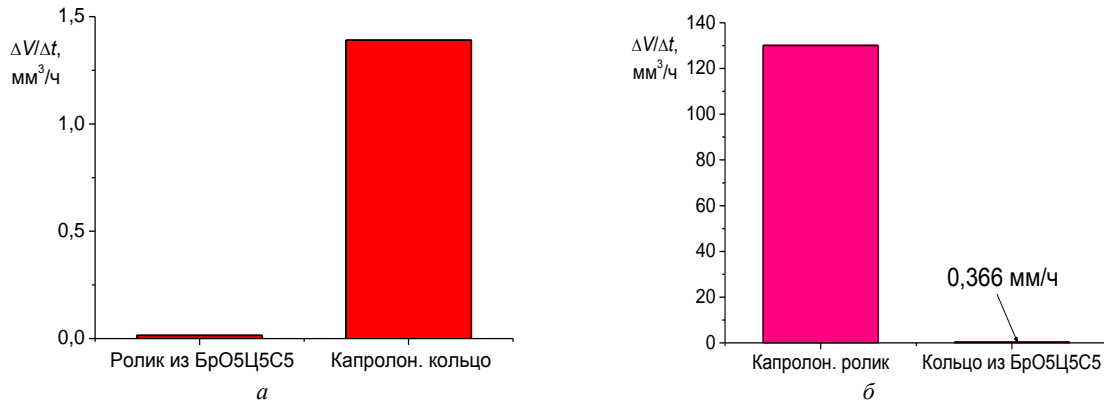


Рис. 4. Скорость изнашивания элементов обратной (а) и прямой (б) пары при трении бронзы БрО5Ц5С5 по капролону

Fig. 4. Wear rate of the elements of the reverse (a) and forward (b) pairs during friction of bronze BrO5Ts5S5 by nylon

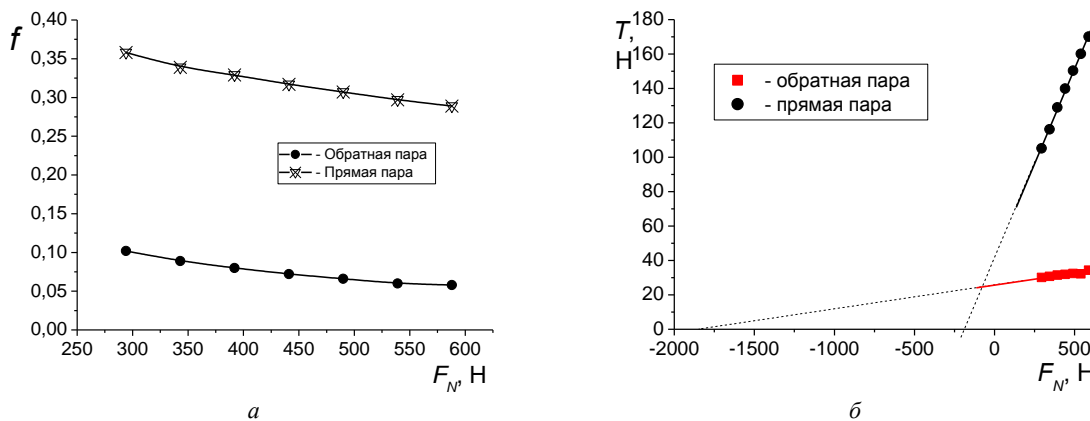


Рис. 5. Зависимость коэффициента трения (а) и силы трения (б) бронзы БрО5Ц5С5 по капролону от нагрузки

Fig. 5. Dependence of the coefficient of friction (a) and the friction force (b) of the bronze BrO5Ts5S5 by nylon on the load

Цветков Ю. Н., Светловская А. С., Третьяков Д. В., Баранов С. Г. Сравнительный анализ трибологических характеристик материалов действующих подшипников при работе по схеме обратной и прямой пары трения

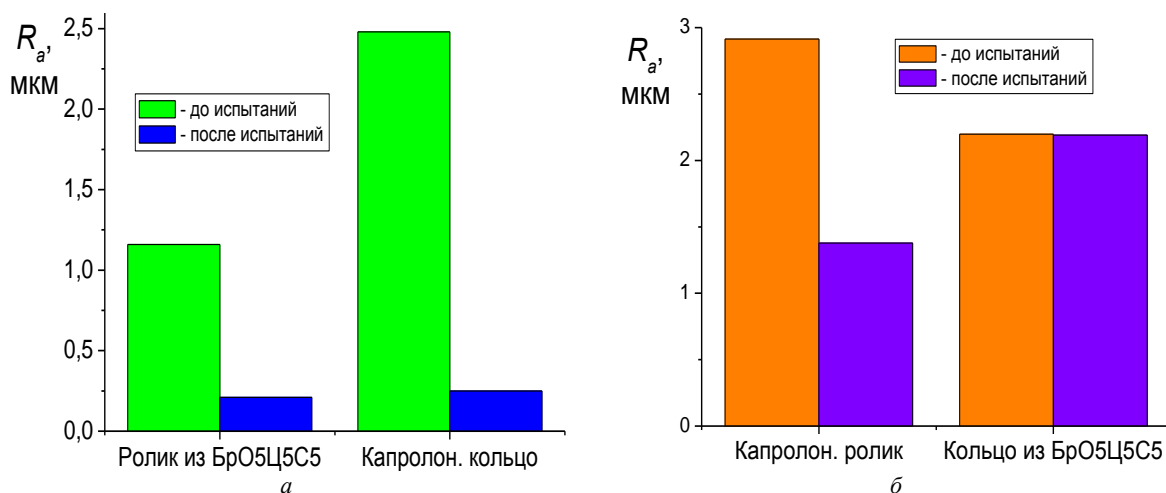


Рис. 6. Изменение шероховатости поверхности элементов обратной (а) и прямой (б) пары при трении бронзы БрО5Ц5С5 по капролону

Fig. 6. Change in the surface roughness of the elements of the reverse (a) and forward (b) pairs during friction of bronze BrO5Ts5S5 on nylon

При смазывании водой большое влияние на трение оказывает смачиваемость элементов пары трения [10–12], поэтому для объяснения большей адгезии в обратном паре трения, используя результаты, изложенные в статье [13], определили краевые углы смачивания элементов прямой и обратной пары трения, соответствующие шероховатости элементов после приработки (табл. 2). Можно от-

метить, что и бронзовая, и капролоновая поверхности являются умеренно гидрофильными, но в целом сумма краевых углов смачивания капролона и бронзы в обратной паре меньше, чем в прямой, однако не настолько существенно, чтобы это было причиной девятикратной разницы в силе адгезии, действующей при трении по схеме прямой и схеме обратной пары (см. рис. 5, б).

Таблица 2

Table 2

**Смачиваемость пресной водой материалов пары трения «бронза БрО5Ц5С5 – капролон»\***

**Fresh water wettability of friction pair materials “bronza BrO5Ts5S5 – nylon”**

Материал	Обратная пара «бронзовый ролик – капролоновое кольцо»		Прямая пара «капролоновый ролик – бронзовое кольцо»	
	$R_a$ после приработки, мкм	Краевой угол, град	$R_a$ после приработки, мкм	Краевой угол, град
Капролон	0,250	74,1	1,378	68,9
Бронза БрО5Ц5С5	0,210	66,5	2,191	76,7

\*Нагрузка составляет 588 Н.

Согласно [14, 15], можно предположить существование следующих зон контакта при трении капролона по металлической поверхности в условиях смазывания водой (рис. 7): участков 1 граничного трения, на которых существует граничная пленка, состоящая из адсорбированных молекул воды; участков 2, представляющих собой микрозазоры, полностью заполненные водой, и участков 3 – микрозазоров, заполненных водой частично, при этом из-за гидрофильности поверхностей трения (см. табл. 2) в частично заполненном водой зазоре образуется мениск 3.

В соответствии с рис. 7 силу трения металла по

полимеру можно разложить на следующие составляющие:

$$T = T_{\text{жид}} + T_{\text{гр}} + T_{\text{кап1}} + T_{\text{кап2}}, \quad (1)$$

где  $T_{\text{жид}}$  – сила трения на участках жидкостной смазки (участки 2 на рис. 7);  $T_{\text{гр}}$  – сила трения на участках граничной смазки (участки 1);  $T_{\text{кап1}}$  – капиллярная составляющая трения, обусловленная поверхностным натяжением воды из-за появления мениска на участках 3;  $T_{\text{кап2}}$  – капиллярная составляющая трения на участках 3, обусловленная неравенством углов смачивания  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  вследствие движения металлической поверхности.

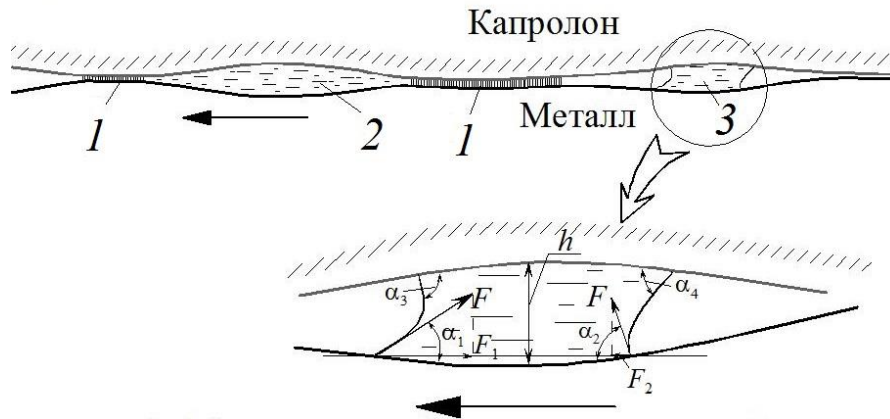


Рис. 7. Схема контакта капролона и бронзы при трении при смазывании водой  
 Fig. 7. Contact diagram of nylon and bronze during friction during water lubrication

Согласно анализу, изложенному в статье [15], составляющими  $T_{жид}$  и  $T_{кап2}$  можно пренебречь и трение определяется главным образом значением  $T_{тр}$  и  $T_{кап1}$ .

По всей видимости, существенно более низкая шероховатость поверхностей трения в обратной паре в сочетании с большей площадью пятна износа на неподвижном элементе пары трения приводит к тому, что давления в зоне контакта в обратной паре трения в несколько раз ниже, чем в прямой паре трения, что приводит к возможности существования большего количества участков 3, а следовательно, капиллярной составляющей  $F_{кап}$  адгезии, при этом сила прижима от действия составляющей  $F_{кап}$  передается на участки 1, вызывая появления составляющей  $T_{кап1}$  (1). В прямой паре трения участки 3 существенно меньше, а поэтому и существенно меньше сила адгезии. Кратное же превышение коэффициента трения в прямой паре, по сравнению с обратной (см. рис. 5, а), обусловлено, вероятно, большой долей деформационной составляющей трения. Последнее подтверждается

и стократным превышением скорости изнашивания капролонового ролика в прямой паре по сравнению с капролоновым кольцом в обратной паре (см. рис. 4), при этом шероховатость бронзового кольца в процессе работы прямой пары трения почти не изменяется (см. рис. 6, б), т. е. микровыступы бронзовой поверхности осуществляют микрорезание поверхности капролонового ролика.

#### Испытания сопряжения нержавеющей стали и капролона

С целью выяснения причин плохой работы прямой пары трения провели эксперименты на сопряжении «капролон – нержавеющая сталь» при разных нагрузках на пару трения. Согласно рис. 8 при всех нагрузках, при которых проводились испытания (588, 392 и 196 Н), коэффициент трения в прямой паре кратно превышает коэффициент трения в обратной паре, причем разница в коэффициентах трения в обратной и прямой парах трения увеличивается с уменьшением нагрузки.

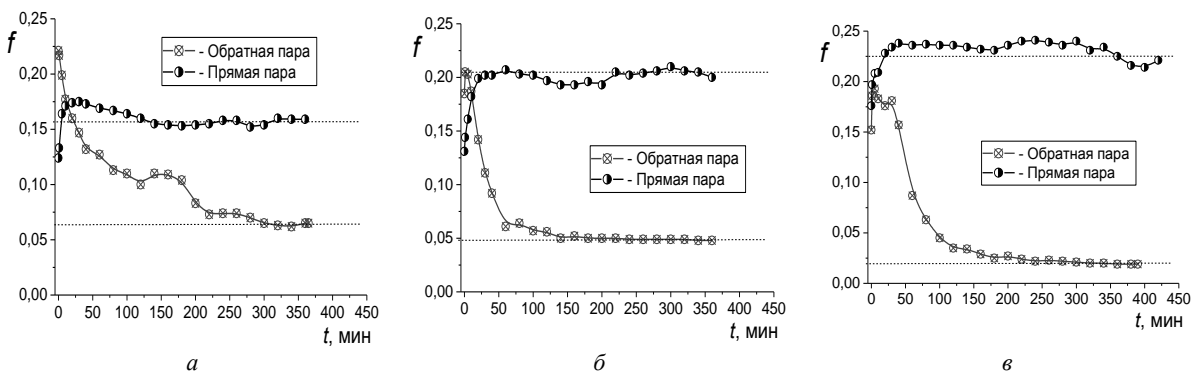


Рис. 8. Осредненная зависимость коэффициента трения в прямой и обратной парах при трении нержавеющей стали по капролону в пресной воде при нагрузке: а – 588 Н; б – 392 Н; в – 196 Н

Fig. 8. The average dependence of the coefficient of friction in the forward and reverse pairs when stainless steel is rubbed against nylon in fresh water under load: а – 588 N; б – 392 N; в – 196 N

Цветков Ю. Н., Светловская А. С., Третьяков Д. В., Баранов С. Г. Сравнительный анализ трибологических характеристик материалов действующих подшипников при работе по схеме обратной и прямой пары трения

Так же, как и при испытании сопряжения «бронза – капролон», в сопряжении «сталь – капролон» отмечается существенное увеличение скорости изнашивания капролонового элемента при переходе

от схемы обратной к схеме прямой пары трения (рис. 9), но порядок увеличения меньше, чем при испытании сопряжения «бронза – капролон».

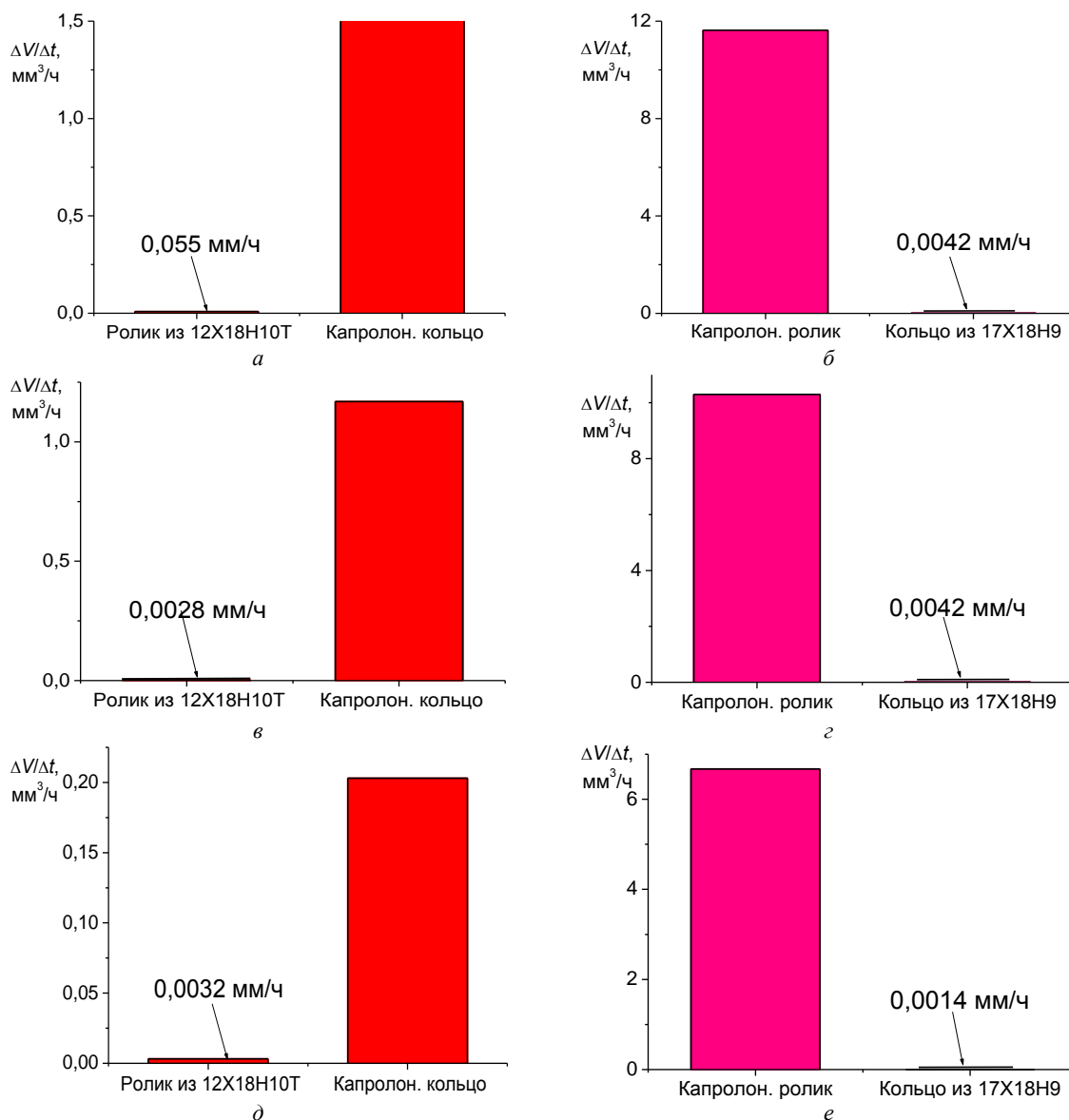


Рис. 9. Скорость изнашивания элементов обратной (а, в, д) и прямой (б, з, е) пар трения «нержавеющая сталь – капролон» при нагрузке: а, б – 588 Н; в, з – 392 Н; д, е – 196 Н

Fig. 9. The wear rate of the elements of the reverse (a, в, д) and forward (б, з, е) pairs of friction “stainless steel – nylon” under load: а, б – 588 N; в, з – 392 N; д, е – 196 N

Измерения шероховатости элементов обратной и прямой пар трения до и после испытаний показали ту же тенденцию, что и при испытании сопряжения «бронза – капролон», а именно: высотный параметр шероховатости капролонового элемента (капролонового ролика в прямой паре и капролонового кольца в обратной паре) принимает значение, равное значению параметра шероховатости сталь-

ного контртела, при этом шероховатость последнего в результате трения не изменяется (рис. 10). По всей видимости, при реализации схемы прямой пары трения на практике необходимо было бы обеспечить как можно меньшую шероховатость поверхности трения стального вкладыша, что технологически значительно сложнее обеспечить по сравнению с обработкой наружной поверхности.

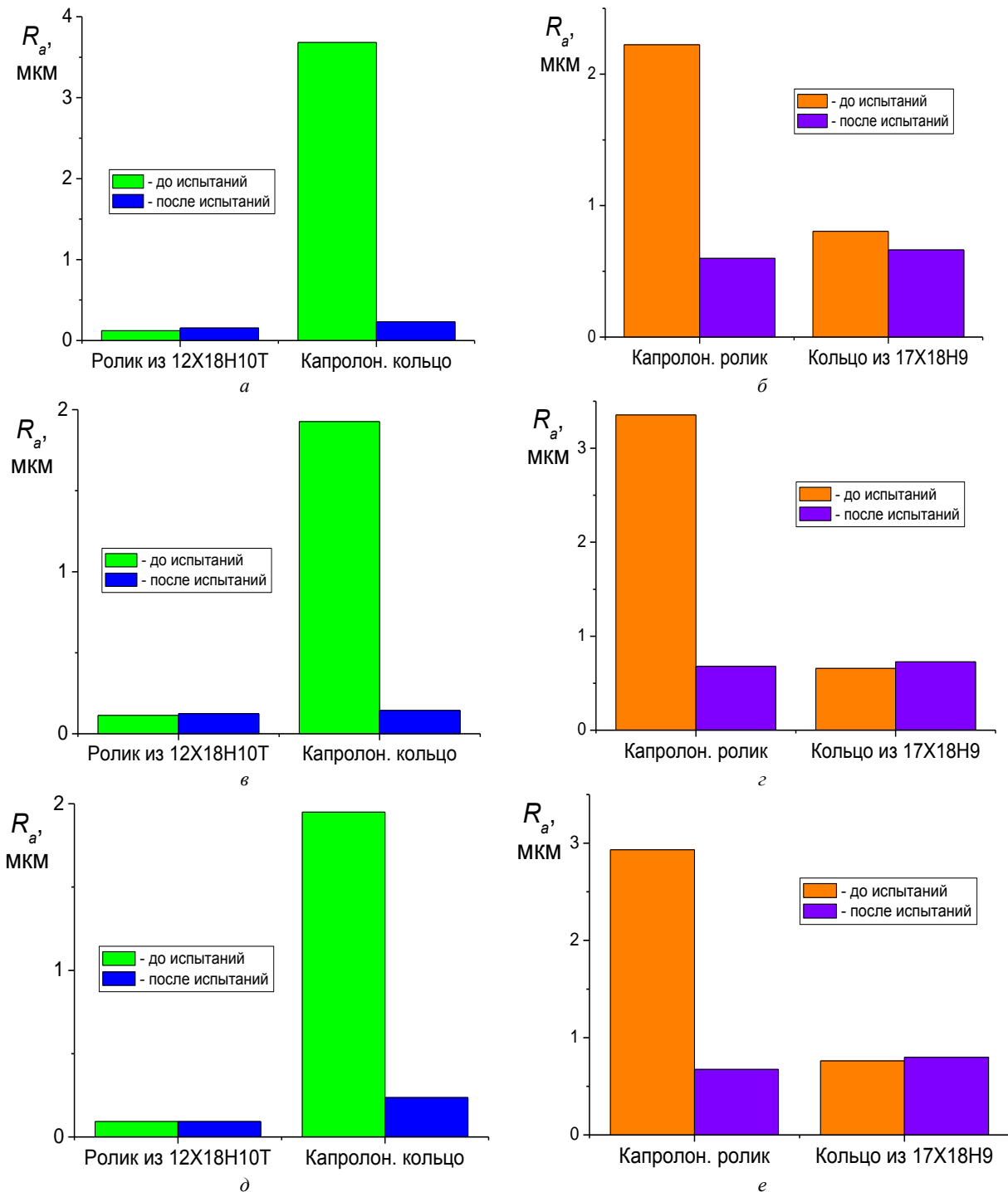


Рис. 10. Изменение шероховатости поверхности элементов обратной (а, в, д) и прямой (б, г, е) пар трения «нержавеющая сталь – капролон» при нагрузке: а, б – 588 Н; в, г – 392 Н; д, е – 196 Н

Fig. 10. Change in surface roughness of the elements of the reverse (a, в, д) and forward (б, г, е) friction pairs “non-rusting steel – nylon” under load: а, б – 588 N; в, г – 392 N; д, е – 196 N

Суммарные значения краевых углов смачивания сопряженных поверхностей, рассчитанные по модели, представленной в [13], для шероховатости, установившейся после испытаний, практически

одинаковы для обратной и прямой пары трения (табл. 3). Таким образом, причины разницы в коэффициентах трения и износах в обратной и прямой парах трения не связаны со смачиваемостью.

Таблица 3

Table 3

Смазываемость пресной водой материалов сопряжения «нержавеющая сталь – капролон», работающего по схеме обратной и прямой пары трения

Fresh water wettability of “stainless steel – nylon” coupling materials operating according to the scheme of reverse and forward pairs of friction

Нагрузка, Н	Материал элемента	Обратная пара «стальной ролик – капролоновое кольцо»		Прямая пара «капролоновый ролик – стальное кольцо»	
		$R_a$ после приработки, мкм	Краевой угол, град	$R_a$ после приработки, мкм	Краевой угол, град
588	Капролон	0,232	74,1	0,599	72,4
	Сталь	0,154	82,5	0,663	84,2
392	Капролон	0,144	74,7	0,681	72,0
	Сталь	0,124	83,4	0,728	86,7
196	Капролон	0,236	74,2	0,674	72,0
	Сталь	0,092	84,5	0,798	90,0

Измерения площади очагов износа на неподвижных элементах прямых и обратных пар трения позволили рассчитать средние давления в зоне контакта. Как видно, зависимости коэффициента трения от давления в контакте разные для прямых и обратных пар трения (рис. 11). Для прямых пар зависимость  $f(p)$  убывающая, а для обратных – возрастающая, что указывает на разные причины

трения: в обратной паре адгезионная составляющая трения является преобладающей, тогда как в прямой паре существенную роль начинает играть деформационная составляющая. При одной и той же нагрузке на прямую и обратную пару трения у последней в зоне контакта давления почти в три раза ниже, чем в прямой паре трения.

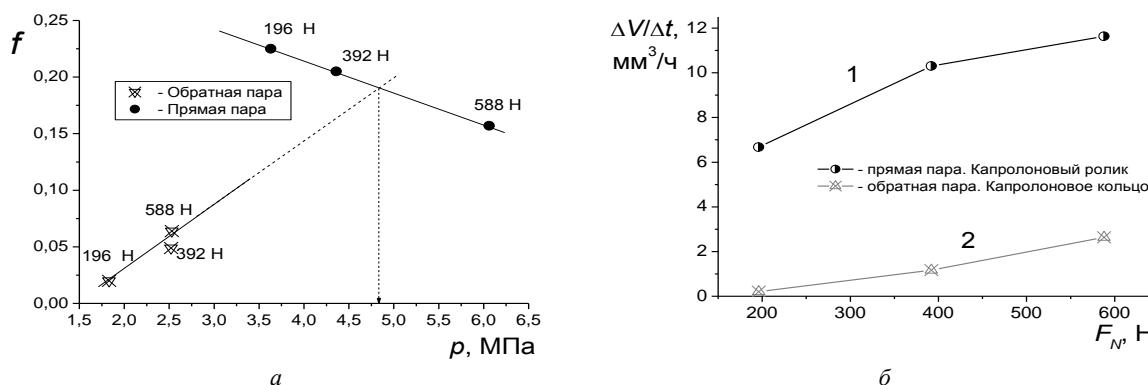


Рис. 11. Зависимости коэффициента трения от давления в контакте (а) и скорости изнашивания от нагрузки (б) в сопряжении нержавеющей стали и капролона при смазывании водой (числа у экспериментальных точек показывают нагрузку на пару трения)

Fig. 11. Dependences of the coefficient of friction on the contact pressure (a) and the wear rate on the load (b) in the coupling of stainless steel and nylon when washed with water (the numbers at the experimental points show the load on the friction pair)

Именно более высокие давления в прямой паре трения, по сравнению с обратной при одной и той же нагрузке, являются причиной кратного увеличения скорости изнашивания в прямой паре трения по сравнению с обратной (рис. 11, б).

### Заключение

При трении сплавов, применяемых для изготовления облицовок гребных валов, по капролону

в условиях граничной смазки в воде, независимо от того, по какой схеме работает сопряжение – по схеме прямой или обратной пары, шероховатость металлического контртела практически не изменяется, а шероховатость поверхности трения капролона изменяется очень существенно. При этом прослеживается четкая тенденция приближения при трении значений высотного параметра шероховатости капролона к значениям параметра шероховатости металла.

Цветков Ю. Н., Светловская А. С., Третьяков Д. В., Баранов С. Г. Сравнительный анализ трибологических характеристик материалов действующих подшипников при работе по схеме обратной и прямой пары трения

Переход работы трибосопряжения «сплав облицовки – капролон» от схемы обратной пары к схеме прямой пары трения приводит при прочих равных условиях к увеличению давления в зоне контакта почти в три раза.

Кратное увеличение давления при переходе к схеме прямой пары трения с учетом малой вязкости и сравнительно малых размеров молекул воды существенно ухудшает условия для существования пленки воды на поверхности трения. Последнее обстоятельство в сочетании с особенностями приработки элементов пары трения «сплав облицовки – капролон» приводит к тому, что в прямой паре трения уве-

личивается доля деформационной составляющей трения. Как следствие, в прямых парах по сравнению с обратными парами кратно увеличиваются износ капролонового элемента и коэффициент трения.

Возможный путь существенного снижения износа капролонового элемента и трения в прямой паре «сплав облицовки – капролон» – обеспечение очень низкой исходной шероховатости поверхности трения металлического контртела. Однако технологически механическая обработка внутренних поверхностей вращения сложнее обработки наружных поверхностей вращения, что на практике приведет к существенному увеличению материальных затрат.

### Список источников

1. Litwin W. Water-lubricated bearings of ship propeller shafts – problems, experimental tests and theoretical investigations // *Polish Maritime Research*. 2009. V. 16. Iss. 4. P. 41–49. DOI 10.2478/v10012-008-0055-z.
2. Litwin W. Experimental research on marine oil-lubricated stern tube bearing // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2019. V. 233. Iss. 11. P. 1773–1781. DOI 10.1177/1350650119846004.
3. Лысенков П. М. Экологически чистая трибосистема судового движительного комплекса // *Трение, износ, смазка*. 2019. Т. 21. № 80. С. 1–7.
4. Григорьев А. К., Звягинцев В. Н. Стендовые испытания подшипника скольжения из антифрикционного материала Торплас фирмы «Thordon Bearings Inc.» // *Вопр. материаловедения*. 2006. № 2 (46). С. 166–172.
5. Westerbaan D., Breton D., Sdao M., Dumanski E., Paciocco M. Eliminating oil and plastic pollution in marine Bearings; an analysis on lignum vitae's environmental impact – Part 1: Availability, Material properties and oil pollution // *FPS-SWST Joint Convention*. 2025. P. 1–29.
6. Халявкин А. А., Комаров М. П., Мамонтов В. А. Оценка влияния износа кормового дейдвудного подшипника на собственную частоту при поперечных колебаниях валопровода судна // *Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология*. 2014. № 3. С. 13–20.
7. Гаркунов Д. Н. Триботехника (конструирование, изготовление и эксплуатация машин). М.: Изд-во МСХА, 2002. 632 с.
8. Прокудин В. Г., Черепнин В. А., Грингауз Д. Л., Молодецкий Э. П. Применение капролона для облицо-

1. вок гребных валов // *Экспресс-информ. Сер.: Судоремонт*. 1983. Вып. 17 (506). С. 15–20.
9. Цветков Ю. Н., Журавлева К. Е. Механизм трения капролона по оловянистой бронзе в условиях граничной смазки // *Вестн. Гос. ун-та мор. и реч. флота им. адм. С. О. Макарова*. 2020. № 4 (62). С. 745–756. DOI 10.21821/2309-5180-2020-12-4-745-756.
10. Peng L., Hsia F. C., Woutersen S., Bonn M., Weber B., Bonn D. Nonmonotonic Friction due to Water Capillary Adhesion and Hydrogen Bonding at Multiasperity Interfaces // *Physical Review Letters*. 2022. N. 129. P. 256101. DOI 10.1103/PhysRevLett.129.256101.
11. Borruto A., Crivelloni G., Marani F. Influence of surface wettability on friction and wear tests // *Wear*. 1998. V. 222. P. 57–65.
12. Zhang Z., Cui Z., Wang H., Jiang C., Zhao J., Ren L. Tribological performance of microstructured surfaces with different wettability from superhydrophilic to superhydrophobic // *Biosurface and Biotribology*. 2020. V. 6. Iss. 4. P. 118–123.
13. Цветков Ю. Н., Павлова К. Д., Светловская А. С. Смачиваемость водой материалов дейдвудных трибосопряжений // *Вестн. Гос. ун-та мор. и реч. флота им. адм. С. О. Макарова*. 2025. Т. 17. № 1. С. 115–126. DOI 10.21821/2309-5180-2025-17-1-115-126.
14. Мур Д. Основы и применения триботоники. М.: Мир, 1978. 487 с.
15. Цветков Ю. Н., Ивко И. Е., Павлова К. Д. Трибологические характеристики материалов дейдвудных подшипников при трении в пресной и морской воде // *Судостроение*. 2025. № 5 (882). С. 19–29.

### References

1. Litwin W. Water-lubricated bearings of ship propeller shafts – problems, experimental tests and theoretical investigations. *Polish Maritime Research*, 2009, vol. 16, iss, 4, pp. 41-49. DOI 10.2478/v10012-008-0055-z.
2. Litwin W. Experimental research on marine oil-lubricated stern tube bearing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2019, vol. 233, iss. 11, pp. 1773-1781. DOI 10.1177/1350650119846004.
3. Lysenkov P. M. Ekologicheski chistaya tribosistema sudovogo dvizhitel'nogo kompleksa [Environmentally friendly tribosystem of the marine propulsion system].

1. *Trenie, iznos, smazka*, 2019, vol. 21, no. 80, pp. 1-7.
4. Grigor'ev A. K., Zvyaginцев V. N. Stendovye ispytaniya podshipnika skol'zheniya iz antifrikcionnogo materiala Torplasa firmy «Thordon Bearings Inc.» [Bench tests of a sliding bearing made of Torplas antifricton material from Thordon Bearings Inc.]. *Voprosy materialovedeniya*, 2006, no. 2 (46), pp. 166-172.
5. Westerbaan D., Breton D., Sdao M., Dumanski E., Paciocco M. Eliminating oil and plastic pollution in marine Bearings; an analysis on lignum vitae's environmental impact – Part 1: Availability, Material properties and oil pollution. *FPS-SWST Joint Convention*, 2025. Pp. 1-29.

6. Halyavkin A. A., Komarov M. P., Mamontov V. A. Ocenka vliyaniya iznosa kormovogo dejdvudnogo podshipnika na sobstvennyuyu chastotu pri poperechnykh kolebaniyah valoprovoda sudna [Assessment of the effect of aft deadwood bearing wear on the natural frequency during transverse vibrations of the ship's shaft]. *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2014, no. 3, pp. 13-20.

7. Garkunov D. N. *Tribotekhnika (konstruirovaniye, izgotovleniye i ekspluatatsiya mashin)* [Tribotechnics (design, manufacture and operation of machines)]. Moscow, Izd-vo MSKHA, 2002. 632 p.

8. Prokudin V. G., Cherepnin V. A., Gringauz D. L., Molodeckij E. P. Primeneniye kaprolona dlya oblicovok grebnykh valov [The use of nylon for propeller shaft linings]. *Ekspresinformatsiya. Seriya: Sudoremont*, 1983, iss. 17 (506), pp. 15-20.

9. Cvetkov Yu. N., Zhuravleva K. E. Mekhanizm treniya kaprolona po olovyanistoy bronzе v usloviyakh granichnoy smazki [The mechanism of friction of nylon on tin bronze under conditions of boundary lubrication]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*, 2020, no. 4 (62), pp. 745-756. DOI 10.21821/2309-5180-2020-12-4-745-756.

10. Peng L., Hsia F. C., Woutersen S., Bonn M., Weber B.,

Bonn D. Nonmonotonic Friction due to Water Capillary Adhesion and Hydrogen Bonding at Multiasperity Interfaces. *Physical Review Letters*, 2022, no. 129, p. 256101. DOI 10.1103/PhysRevLett.129.256101.

11. Borruto A., Crivelloni G., Marani F. Influence of surface wettability on friction and wear tests. *Wear*, 1998, vol. 222, pp. 57-65.

12. Zhang Z., Cui Z., Wang H., Jiang C., Zhao J., Ren L. Tribological performance of microstructured surfaces with different wettability from superhydrophilic to superhydrophobic. *Biosurface and Biotribology*, 2020, vol. 6, iss. 4, pp. 118-123.

13. Cvetkov Yu. N., Pavlova K. D., Svetlovskaya A. S. Smachivaemost' vodoj materialov dejdvudnykh tribosopryazheniy [Water wettability of deadwood tribo materials]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*, 2025, vol. 17, no. 1, pp. 115-126. DOI 10.21821/2309-5180-2025-17-1-115-126.

14. Mur D. *Osnovy i primeneniya triboniki* [Fundamentals and applications of tribonics]. Moscow, Mir Publ., 1978. 487 p.

15. Cvetkov Yu. N., Ivko I. E., Pavlova K. D. Tribologicheskie harakteristiki materialov dejdvudnykh podshipnikov pri trenii v presnoj i morskoy vode [Tribological characteristics of deadwood bearing materials under friction in fresh and sea water]. *Sudostroenie*, 2025, no. 5 (882), pp. 19-29.

Статья поступила в редакцию 26.11.2025; одобрена после рецензирования 27.01.2026; принята к публикации 02.02.2026  
The article was submitted 26.11.2025; approved after reviewing 27.01.2026; accepted for publication 02.02.2026

### Информация об авторах / Information about the authors

**Юрий Николаевич Цветков** – доктор технических наук, профессор; заведующий кафедрой технологии судоремонта; Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова; yuritsvet@mail.ru

**Арина Станиславовна Светловская** – инженер-технолог; ООО «СпецМорСервис»; kiddag@mail.ru

**Дмитрий Викторович Третьяков** – кандидат технических наук; доцент кафедры технологии материалов и материаловедения; Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова; tretyakski@inbox.ru

**Сергей Геннадьевич Баранов** – старший преподаватель кафедры технологии материалов и материаловедения; Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова; baranovsg@gumrf.ru

**Yuriy N. Tsvetkov** – Doctor of Technical Sciences, Professor; Head of the Department of Ship Repair Technologies; Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping; yuritsvet@mail.ru

**Arina S. Svetlovskaya** – Manufacturing Engineer; SpetsMorServis LLC; kiddag@mail.ru

**Dmitriy V. Tretyakov** – Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department of Technology of Materials and Material Science; Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping; tretyakski@inbox.ru

**Sergey G. Baranov** – Senior Lecturer of the Department of Technology of Materials and Material Science; Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping; baranovsg@gumrf.ru

