

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-115-126

EDN KJUPOC

WETTABILITY OF STERN-TUBE TRIBOPAIRS MATERIALS WITH WATER

Y. N. Tsvetkov¹, K. D. Pavlova², A. S. Svetlovskaya³

¹ — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
Saint Petersburg, Russian Federation,

² — Joint-Stock Company «Central Design Bureau «Iceberg»»,
Saint Petersburg, Russian Federation,

³ — Specmorservice Ltd. Co,
Saint Petersburg, Russian Federation

The wettability of materials used for manufacturing water-lubricated stern-tube bearings — polyamide and rubber 8I30 as well as materials used for propeller shaft journal linings — stainless steel 12Ch18N10T and tin bronze BrO5Ts5S5 — was investigated. Wettability was evaluated by measuring the contact angle. Based on the experimental results, second-order models were developed to describe the contact angle as a function of water salinity and arithmetic mean deviation of the profile. A similar influence of the investigated factors on the wettability of bronze and stainless steel was revealed, which, for polymers, not only differs significantly from that of metallic alloys, but also the change in wettability of polyamide differs from that of rubber with a change in these factors. It is noted that the salt content in seawater has a weak influence on the wettability of lining materials, but the surface roughness has a noticeable influence on it; moreover, there is a value of the height parameter Ra at which the wettability reaches a maximum value. For rubber, on the contrary, the surface roughness has a weak influence on the wettability by water, but the salt content in water has a very strong influence on it (in fresh water, rubber exhibits pronounced hydrophilic properties, while in seawater it becomes hydrophobic). The hydrophilicity of polyamide shows a moderate increase both with an increase in the salt content in water and with an increase in the roughness of its surface. It is proposed to use a hydrophilic material for the bearing in a stern-tube tribopair lubricated with water, in combination with a pronounced hydrophobic material for the lining; accordingly, in seawater, it is advisable to use polyamide bearings instead of rubber-metal bearings. Based on the results obtained, it seems reasonable to conduct research on replacing bronze and stainless steel in the manufacture of linings with other materials exhibiting pronounced hydrophobic properties.

Keywords: stern-tube bearing, rubber, polyamide, tin bronze, stainless steel, fresh water, sea water, water salinity, surface roughness, wettability, contact angle.

For citation:

Tsvetkov, Yuriy N., K. D. Pavlova and A. S. Svetlovskaya. “Wettability of stern-tube tribopairs materials with water.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.1 (2025): 115–126. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-115-126.

УДК 620.179

СМАЧИВАЕМОСТЬ ВОДОЙ МАТЕРИАЛОВ ДЕЙДВУДНЫХ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ

Ю. Н. Цветков¹, К. Д. Павлова², А. С. Светловская³

¹ — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — АО ЦКБ «Айсберг», Санкт-Петербург, Российская Федерация

³ — ООО «СпецМорСервис», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Исследована смачиваемость водой материалов, применяемых для изготовления дейдвудных подшипников, работающих при смазывании водой: капролона и резины 8130, а также материалов, применяемых для изготовления облицовок гребных валов: стали 12Х18Н10Т и оловянистой бронзы БрО5Ц5С5. Оценка смачиваемости выполнена по значению краевого угла смачивания. По результатам опытов выполнено построение моделей второго порядка, описывающих значения краевого угла смачивания от содержания солей в воде и шероховатости поверхности. Выявлен схожий характер влияния исследуемых факторов на смачиваемость бронзы и нержавеющей стали, который для полимеров не только существенно отличается от аналогичного для металлических сплавов, но и характер изменения смачиваемости капролона при изменении этих факторов отличается от характера изменения смачиваемости резины. Отмечается, что содержание солей в морской воде оказывает слабое влияние на смачиваемость материалов облицовок, заметное влияние на нее оказывает шероховатость поверхности, при этом существует значение высотного параметра R_a , при котором смачиваемость достигает максимального значения. Для резины, наоборот, шероховатость поверхности имеет слабое влияние на смачиваемость водой, но однако содержание солей в воде оказывает на нее очень сильное влияние (в пресной воде резина проявляет выраженные гидрофильные свойства, а в морской становится гидрофобной). Гидрофильность капролона как при увеличении содержания солей в воде, так и при увеличении шероховатости его поверхности, показывает умеренное увеличение. Предлагается использовать в дейдвудном трибосопряжении, смазываемом водой, гидрофильный материал подшипника в сочетании с выраженным гидрофобным материалом облицовки, и, соответственно, в морской воде целесообразно вместо резинометаллических подшипников использовать капролоновые. На основании полученных в работе результатов представляется целесообразным выполнить исследования по замене бронзы и нержавеющей стали при изготовлении облицовок из иного материала с выраженной гидрофобностью.

Ключевые слова: дейдвудный подшипник, резина, капролон, оловянистая бронза, нержавеющая сталь, пресная вода, морская вода, соленость воды, шероховатость, смачиваемость, краевой угол смачивания.

Для цитирования:

Цветков Ю. Н. Смачиваемость водой материалов дейдвудных трибосопряжений / Ю. Н. Цветков, К. Д. Павлова, А. С. Светловская // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 1. — С. 115–126. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-115-126. — EDN KJUPOC.

Введение (Introduction)

Дейдвудное устройство относится к одному из самых ответственных на судне, от надежности которого зависит безопасность мореплавания и потери на трение при передаче энергии от главного двигателя на гребной винт. Дейдвудное устройство располагается в недоступном для персонала судна месте и не подлежит ремонту в эксплуатации, поэтому, как правило, неполадки с дейдвудным устройством приводят к аварийной ситуации.

Большинство дейдвудных подшипников по экологическим соображениям смазываются водой [1]. В этом случае в качестве материала для них используются полиамиды, чаще всего капролон или резины 8130, 8075 и 1626 (Рубин М. Б. Подшипники в судовой технике: справ. — Л.: Судостроение, 1987. — 344 с.). Вязкость воды в среднем на три порядка меньше вязкости смазочного масла, а способность воды смачивать металлические материалы и указанные полимеры значительно уступает таковой для смазочных масел, поэтому трение и износ в сопряжениях, смазываемых водой, существенно превышают трение и износ в элементах дейдвудных сопряжений, смазываемых маслом. По этой причине на шейки гребных валов при смазывании водой устанавливают облицовки. По статистике, по количеству отказов кормовой и носовой дейдвудный подшипники при смазывании водой занимают третье и четвертое место соответственно в отказах элементов движительного комплекса [1].

Очевидно, что в возможности снижения трения и повышения износостойкости трибосопряжений дейдвудных устройств, смазываемых водой, имеется огромный резерв. Условием хорошего удержания смазочной жидкости на поверхности трения и равномерного распределения жидкости по поверхности является хорошая смачиваемость поверхностей трения смазочной жидкостью. Для реализации гидродинамической смазки смачиваемость поверхности важна, так как существует прямая связь между смачиваемостью и адгезией смазочной жидкости к поверхности трения [2], поэтому при недостаточной смачиваемости невозможно обеспечить относительный сдвиг

слоев жидкости по толщине, а значит и гидродинамическая подъемная сила [3], обеспечивающая «всплытие» одной поверхности над другой, возникать не будет.

Что касается граничной смазки, то здесь многое определяется молекулярной структурой смазочной жидкости, молекулы минеральных масел имеют строение в виде длинных цепей, что при хорошей смачиваемости позволяет обеспечить образование граничной пленки с правильной структурой в виде «частокола» цепных молекул. Такая структура обеспечивает низкий коэффициент трения, так как соприкасающиеся метильные концевые группы ($-CH_3$), принадлежащие разным граничным пленкам двух контактирующих поверхностей, связаны друг с другом слабыми дисперсионными силами — силами Лондона. При этом чем длиннее молекулярные цепи, тем на большее расстояние «отодвигаются» друг от друга поверхности и тем меньше сила притяжения твердых фаз (поверхностей трения) [2]. Поэтому требование хорошей смачиваемости поверхности при использовании смазочных масел в условиях граничной смазки, как правило, является обязательным, за исключением случаев, когда применяются материалы, имеющие низкую адгезию сами по себе, т. е. обеспечивающие ее автономно без использования смазочных материалов (при сухом трении), такие как фторопласт.

При использовании в качестве смазочной жидкости воды именно граничный режим смазки в кормовых дейдвудных подшипниках является основным. Это объясняется не только малой вязкостью воды, но и характером распределения давлений по поверхности трения дейдвудного подшипника. Согласно расчетным данным (см. *Рубин М. Б.* Подшипники в судовой технике: справ. — Л: Судостроение, 1987. — 344 с.) под действием силы тяжести гребного винта максимальное контактное давление на кормовом участке кормового дейдвудного подшипника более чем в 100 раз превышает предельное значение номинального давления, регламентированного Правилами Российского морского регистра судоходства. Это подтверждается также характером износа дейдвудных подшипников, бывших в эксплуатации [4], [5]. Кроме того, следует отметить, что для монолитных резинометаллических подшипников (ГОСТ 7199–77), для капролоновых подшипников типа I и II в исполнении 1 (ОСТ 5.4183–76), а также для наборных капролоновых и резинометаллических подшипников гидродинамический режим трудноосуществим по конструктивным соображениям, а именно из-за наличия продольных канавок. По мере изнашивания подшипника давления выравниваются, однако и по достижении предельного износа давление на кормовом участке примерно на 70 % выше, чем на носовом.

Молекулы воды по строению отличаются от молекул углеводородов, поэтому для воды ответ на вопрос о влиянии смачиваемости на трибологические характеристик поверхностей остается открытым. Чем больше шероховатость, тем выше вероятность разрушения граничной пленки воды на вершинах неровностей даже при хорошей смачиваемости, поэтому для сохранения сплошной граничной пленки воды на поверхности трения необходимо применять поверхности с малой шероховатостью, однако при этом между граничными пленками воды, образовавшимися на двух контактирующих поверхностях, возникают сильные водородные связи, и трение может существенно возрасти [6], [7], т. е. при смазывании водой в условиях граничной смазки требование хорошей смачиваемости поверхностей трения не является бесспорным. В работе [8] показано, что при смазывании водой минимальное трение достигается при сочетании в паре трения материалов с резко различающейся смачиваемостью, при этом неподвижный элемент (палец) должен быть изготовлен из гидрофильного материала, а подвижный (вращающийся диск) — из гидрофобного. Это подтверждается также в работе [9], в которой получены результаты, свидетельствующие о том, что самый низкий коэффициент трения обеспечивается при использовании вращающегося элемента трения с выраженной гидрофобной поверхностью.

Эксплуатация судна происходит в воде разной солености. При работе сопряжения шероховатость поверхностей подшипника и облицовки гребного вала изменяется, при этом изменяется и смачиваемость поверхностей трения, а значит, и потери на трение в дейдвудных подшипниках. Тем не менее в литературе отсутствуют данные, обосновывающие значения параметров шероховатости облицовок и дейдвудных подшипников, указанные в рекомендациях отрасле-

вых стандартов^{1,2,3}. Первым шагом для обоснования этих рекомендаций следует считать изучение влияния основных факторов на смачиваемость водой материалов дейдвудных трибосопряжений: шероховатости поверхности материала и содержания солей в воде.

Целью работы является построение моделей, описывающих смачиваемость материалов дейдвудных трибосопряжений водой в зависимости от шероховатости поверхности материала и содержания солей в воде.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Чаще всего на практике в дейдвудных подшипниках, смазываемых водой, применяют следующие сочетания материалов: капролон — оловянистая бронза и резина — нержавеющая сталь. Капролон и резина используются для изготовления втулок или вкладышей дейдвудных подшипников, а оловянистая бронза и нержавеющая сталь — для изготовления облицовок шеек гребных валов. Поэтому для испытаний были выбраны два материала дейдвудных подшипников: резина 8130 и капролон, и два материала для облицовок: бронза Бр05Ц5С5 и сталь 12Х18Н10Т.

Из капролона, бронзы и стали были изготовлены диски диаметром около 50 мм и толщиной около 12 мм, в качестве рабочих поверхностей использовались плоские поверхность дисков. Из резины изготавливали образцы в виде прямоугольных параллелепипедов размером примерно 10 × 10 × 12 мм, их вырезали из новой резинометаллической планки для набора дейдвудного подшипника, в качестве рабочих поверхностей использовались грани 10 × 12 мм.

Для создания разной шероховатости поверхности испытуемых материалов рабочие поверхности образцов обрабатывали абразивной шкуркой разной зернистости, после чего шероховатость поверхности оценивали щуповым методом [10] на приборе MahrSurf PS1 по значению среднего арифметического отклонения профиля поверхности R_a . Базовую длину назначили равной 0,8 мм. Длина оценки включала пять базовых длин, т. е. была равна 4,0 мм, а длина трассирования, соответственно, 5,6 мм. Трассирование проводили трижды в пределах участка поверхности, на который планировалось наносить капли воды, за окончательный результат брали среднее арифметическое.

В опытах использовали воду с тремя разными значениями содержания солей: мягкую пресную, искусственную морскую с содержанием соли 1,89 масс.% и искусственную морскую с содержанием солей 3,78 масс.%. В качестве пресной использовали отстоявшуюся водопроводную воду г. Санкт-Петербурга, в которой условно было принято содержание солей, равное 0 масс.%. Для приготовления искусственной морской воды пользовались рекомендациями [11], согласно которым морской воде с содержанием солей 3,78 масс.% соответствовал состав, указанный в табл. 1. Морскую воду с содержанием солей 1,89 масс.% получали, разбавляя мягкой пресной водой морскую воду с содержанием солей 3,78 масс.%.

Диапазон изменения шероховатости выбирали таким образом, чтобы в него попадали значения шероховатости материалов в исходном (перед началом эксплуатации) состоянии и установившиеся при трении. Последние значения получали по результатам испытания на машине трения.

Таблица 1

Состав искусственной морской воды [11]

Соль	Концентрация, г/л
Хлорид натрия NaCl	24,6
Хлорид калия KCl	0,67
Двухводный хлорид кальция $\text{CaCl}_2 \times 2\text{H}_2\text{O}$	1,36
Семиводный сульфат магния $\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$	6,29
Шестиводный хлорид магния $\text{MgCl}_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$	4,66
Бикарбонат натрия (сода) NaHCO_3	0,18

¹ ОСТ5.4183–76. Подшипники гребных и дейдвудных валов капролоновые. Общие технические условия. Изд. офиц. Введ. 27 октября 1976 г.

² ГОСТ 7199–77. Подшипники резинометаллические судовые. Технические условия. Изд. офиц. М.: ИПК «Изд-во стандартов», 2002.

³ ОСТ5.4097–85. Валы судовых валопроводов. Общие технические условия. Изд. офиц. Взамен ОСТ5.4097–74.

Ориентировочные данные по исходной шероховатости поверхностей материалов дейдвудных подшипников и облицовок гребных валов, определенные согласно рекомендациям стандартов: ГОСТ 7199–77, ОСТ5.4183–76 и ОСТ5.4097–85, а также по результатам измерений, выполненных на реальных подшипниках, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметр R_a исходной шероховатости элементов дейдвудных трибоспряжений, смазываемых водой

Материал дейдвудного подшипника	Материал полимерного подшипника при работе в паре с облицовкой		Материал облицовки	
	Sn-бронза	Нержавеющая сталь	Sn-бронза	Нержавеющая сталь
Резина	Около 0,5 мкм	Около 0,5 мкм	$\leq 1,25$ мкм (полируют)	$\leq 1,25$ мкм (полируют)
Капролон	$\leq 2,5$ мкм	$\leq 2,5$ мкм	$\leq 1,25$ мкм (полируют)	$\leq 1,25$ мкм (полируют)

При проведении опытов использовали образцы каждого материала с тремя значениями R_a : для резины 8130 $R_a = 5,109; 2,913$ и $0,496$ мкм; для капролона $R_a = 5,676; 2,234$ и $0,721$ мкм; для бронзы БрО5Ц5С5 $R_a = 1,746; 0,633$ и $0,190$ мкм; для стали 12Х18Н10Т $R_a = 0,549; 0,318$ и $0,053$ мкм.

Смачиваемость материалов оценивали нанесением капель на поверхность материалов и измерением краевого угла смачивания α (рис. 1). Полная смачиваемость, как известно, характеризуется углом $\alpha = 0$, полная несмачиваемость — углом $\alpha = 180^\circ$ [12]. На образцы разной шероховатости каждого материала наносили по три капли пресной и морской воды с содержанием солей, соответственно, 1,89 и 3,78 масс.%. Нанесение капель выполняли с помощью пипетки. Их фотографировали, распечатывали фото в большом увеличении и определяли графически на каждой капле краевой угол смачивания, как показано на рис. 1, т. е. измеряли краевой угол на фото каждой из трех капель с левой и с правой стороны изображения капли: $\alpha_{л}$ и $\alpha_{пр}$, затем находили среднее арифметическое шести значений. В результате для каждого материала каждой комбинации значений шероховатости поверхности и содержания солей в воде было получено осредненное значение краевого угла смачивания.

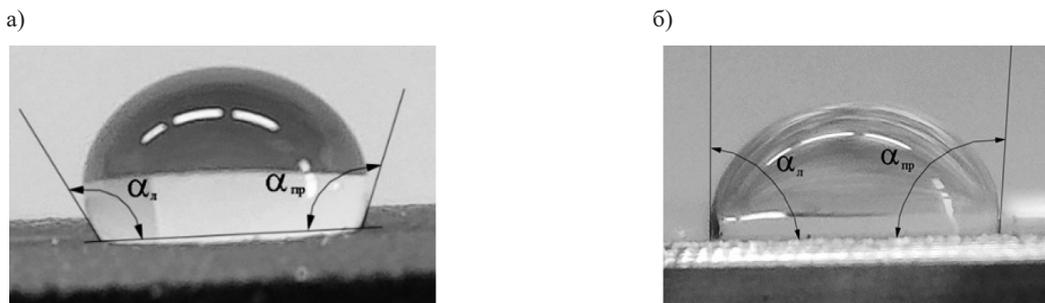


Рис. 1. Определение углов смачивания:

- а — на примере капли воды с концентрацией солей 3,78 % на резине 8130 с параметром шероховатости поверхности $R_a = 5,109$ мкм;
- б — на примере капли пресной воды на стали 12Х18Н10Т с параметром шероховатости поверхности $R_a = 0,549$ мкм

Смачиваемость определяется двумя факторами: соленостью воды и шероховатостью поверхности. Зависимость краевого угла от содержания солей в воде и шероховатости поверхности описывали моделью 2-го порядка:

$$\alpha = b_0 + b_1 R_a + b_2 C + b_3 R_a^2 + b_4 C^2 + b_5 R_a C, \quad (1)$$

где α — значение граничного угла;

C — концентрация солей (% по массе) в воде;

b_0, b_1, \dots, b_5 — неизвестные коэффициенты модели.

Как видно из уравнения (1), всего в модели шесть неизвестных параметров: b_0, b_1, \dots, b_5 , поэтому минимальное количество опытов, которые необходимо провести, равно шести. Было принято решение провести не менее девяти опытов, отличающихся значениями R_a и C . Это позволило произвести надежное усреднение с использованием метода наименьших квадратов.

Для компактной записи уравнений (1) ввели следующие обозначения: $R_a = z_{i1}$; $C = z_{i2}$; $R_a^2 = z_{i3}$; $C^2 = z_{i4}$; $R_a C = z_{i5}$, где i — номер опыта (уравнения).

По результатам испытаний построили систему уравнений:

$$\alpha_i = b_0 + b_1 z_{i1} + b_2 z_{i2} + b_3 z_{i3} + b_4 z_{i4} + b_5 z_{i5}, \quad (2)$$

где $i = 1 \dots 9$;

α_i — значение угла смачиваемости, полученное в результате эксперимента в i -м опыте.

Решение системы (2), согласно процедуре метода наименьших квадратов, в матричной форме имеет следующий вид [13]:

$$B = (Z^T Z)^{-1} Z^T A, \quad (3)$$

где B — вектор-столбец искомых коэффициентов b_0, b_1, \dots, b_5 аппроксимирующей функции (1);

Z — матрица всех значений факторов $z_{i1}; z_{i2}; z_{i3}; z_{i4}; z_{i5}$, использованных при проведении опытов, включая первый единичный столбец;

Z^T — матрица, транспонированная по отношению к матрице Z ;

A — вектор-столбец значений величины граничного угла, полученных экспериментально.

Результаты (Results)

Построенная модель, описывающая смачиваемость резины 8130, имеет следующий вид:

$$\alpha = 72,19 + 25,71R_a + 7,295C - 2,998R_a^2 - 2,608C^2 - 0,1375R_a C. \quad (4)$$

Графический вид модели, описывающей смачиваемость резины 8130, приведен на рис. 2, а.

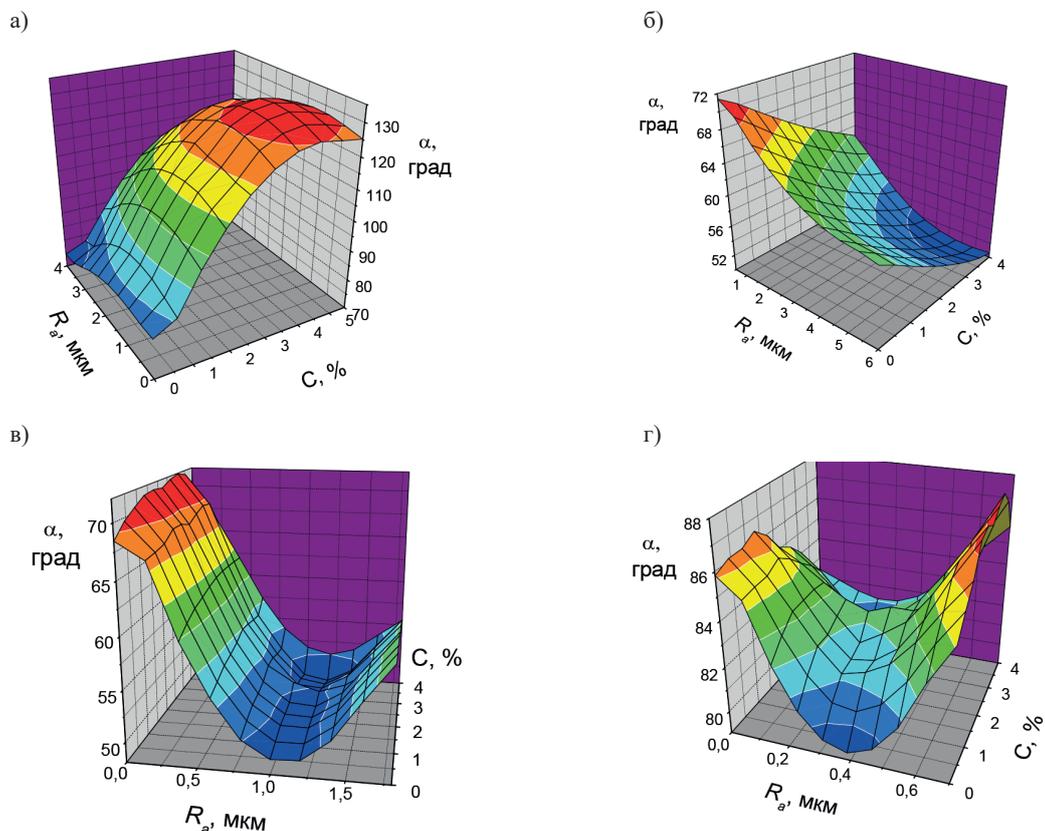


Рис. 2. Зависимость краевого угла смачивания от значения высотного параметра шероховатости и солености воды: а — резины 8130; б — капролона; в — бронзы БрО5Ц5С5; г — стали 12Х18Н10Т

Для капролона вид модели следующий:

$$\alpha = 75,426 - 5,424R_a - 4,034C + 0,4967R_a^2 + 0,2706C^2 - 0,0534R_aC. \quad (5)$$

Графический вид модели для капролона представлен на рис. 2, б.

Модель, описывающая смачиваемость бронзы БрО5Ц5С5, получена в виде:

$$\alpha = 75,784 - 48,744R_a + 1,816C + 22,429R_a^2 - 0,2566C^2 - 0,9361R_aC. \quad (6)$$

Графический вид модели, описывающей смачиваемость бронзы БрО5Ц5С5, приведен на рис. 2, в, вид функции отклика, описывающей смачиваемость стали 12Х18Н10Т, — на рис. 2, г.

Модель смачиваемости стали 12Х18Н10Т записывается следующим образом:

$$\alpha = 88,323 - 47,369R_a + 1,259C + 61,948R_a^2 - 0,6089C^2 + 2,753R_aC. \quad (7)$$

Проверка по критерию Фишера показала, что адекватность построенной модели для резины 8130 обеспечивается на 25%-м уровне значимости, для капролона на 5%-м уровне значимости, для бронзы БрО5Ц5С5 и стали 12Х18Н10Т — примерно на 30%-м уровне значимости [13], [14].

Обсуждение (Discussion)

Как видно из анализа поверхности функции отклика на рис. 2, влияние солёности воды и шероховатости поверхности на смачиваемость принципиально отличается для металлических и полимерных материалов. При этом, если характер влияния исследуемых факторов для бронзы и нержавеющей стали (см. рис. 2, в, г) на смачиваемость схожий, то для полимеров (см. рис. 2, а, б) он не только существенно отличается от аналогичного для металлических сплавов, но также если сравнивать капролон и резину между собой, то характер изменения их смачиваемости при изменении факторов принципиально отличается друг от друга. Видно, что для металлических материалов облицовок содержание солей в морской воде оказывает слабое влияние на смачиваемость облицовок. Вместе с тем заметное влияние на нее оказывает шероховатость поверхности. При этом существует значение параметра R_a , при котором смачиваемость проходит через максимум (минимум краевого угла): для бронзы максимум смачиваемости достигается при $R_a \approx 1,0$ мкм, для нержавеющей стали — при $R_a \approx 0,4$ мкм. Для резины, наоборот, шероховатость поверхности имеет слабое влияние на смачиваемость водой, но при этом содержание солей в воде оказывает очень сильное влияние на смачиваемость: если в пресной воде резина проявляет выраженные гидрофильные свойства, то в морской воде она становится гидрофобной. Для капролона и шероховатость поверхности, и солёность воды оказывают примерно схожее влияние на его смачиваемость: как при увеличении солёности, так и при увеличении шероховатости происходит умеренное увеличение гидрофильности поверхности.

Сложность оценки влияния шероховатости на смачиваемость материалов дейдвудных подшипников состоит в том, что капролон и резина поглощают воду, а значит, в процессе эксплуатации судна смачиваемость поверхностей трения дейдвудных подшипников будет увеличиваться: капролона, вероятно, в большей степени из-за существенного поглощения капролоном воды, резины — в меньшей. При этом полимерные материалы в значительной степени деформируются в зоне контакта с металлическим контртелом, поэтому фактическая шероховатость в зоне контакта в процессе трения отличается от измеренной на поверхности трения после выведения ее из контакта. По всей видимости, профиль поверхности полимера в зоне трения будет воспроизводить профиль поверхности металлической облицовки, при этом шероховатость поверхности после выведения поверхности из контакта будет зависеть от механизма изнашивания полимера и его жесткости.

Многочасовые испытания на машине трения МИ-1 неподвижного капролонового кольца в паре с роликом из стали 12Х18Н10Т (рис. 3) и бронзы БрО5Ц5С5 (рис. 4) в пресной и морской воде показали, что шероховатость поверхности трения капролона после приработки приближается к шероховатости металлического контртела, в то время как у резины, наоборот (рис. 5).

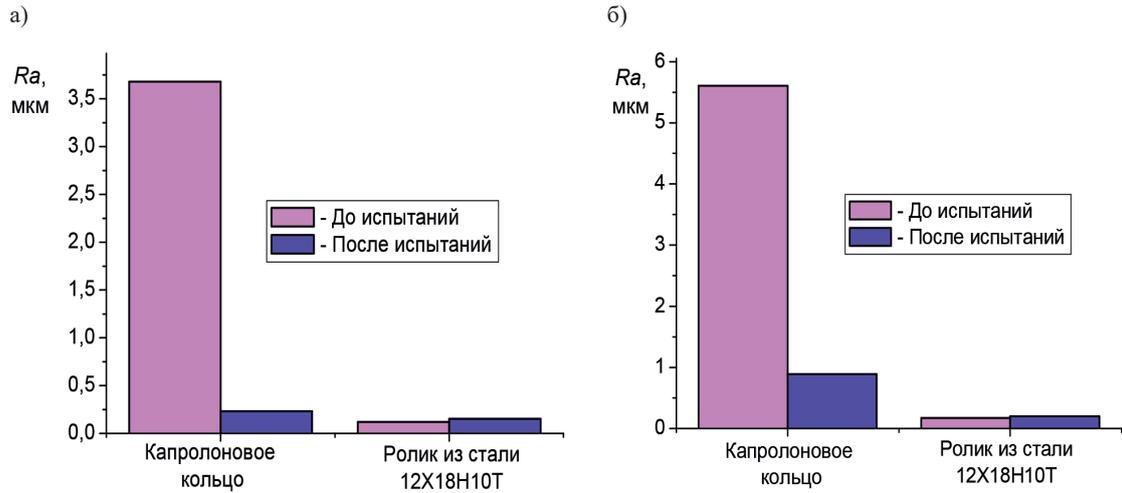


Рис. 3. Шероховатость поверхности трения элементов трибосопряжения капролоновое кольцо – ролик из стали 12X18H10T до и после испытаний: а — в пресной воде; б — в морской воде

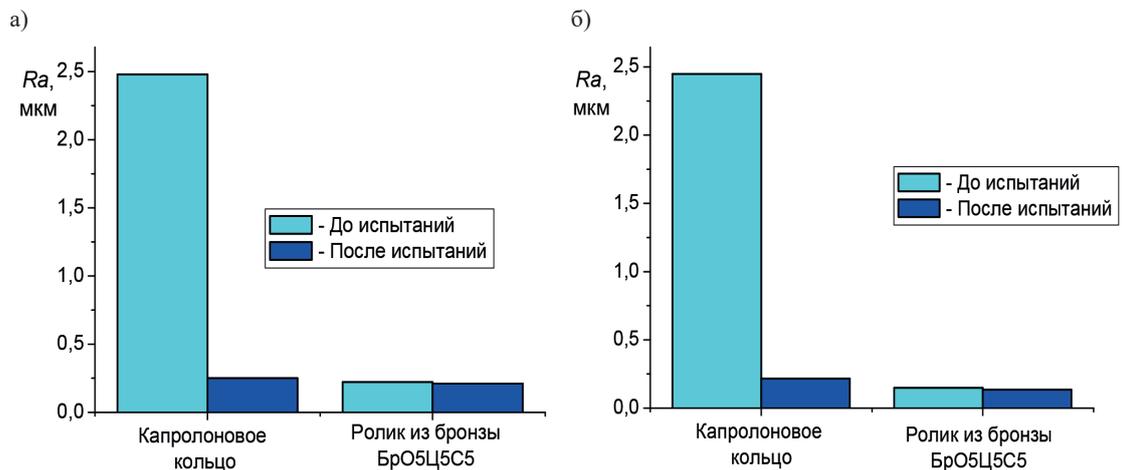


Рис. 4. Шероховатость поверхности трения элементов трибосопряжения капролоновое кольцо — ролик из бронзы BrO5Ц5С5 до и после испытаний: а — в пресной воде; б — в морской воде

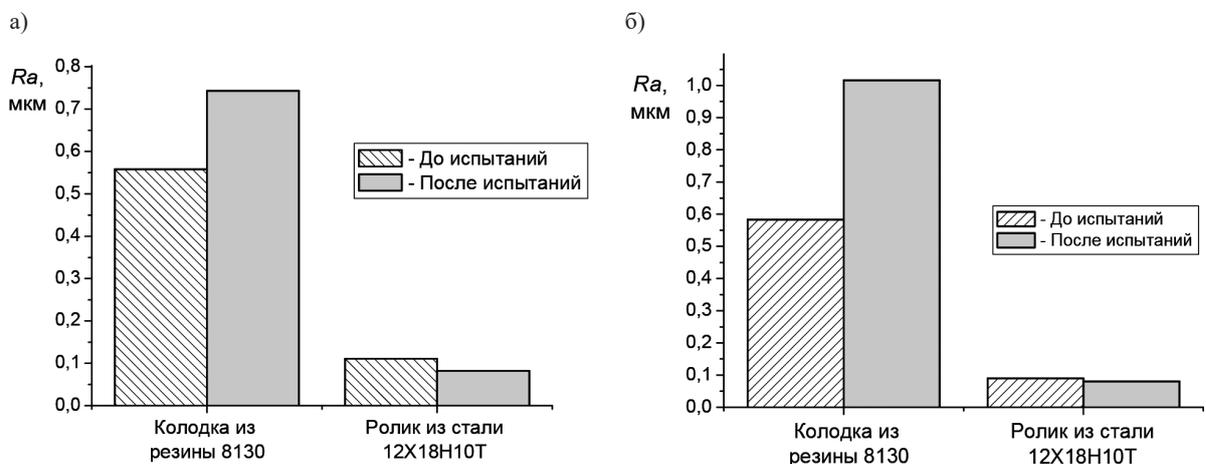


Рис. 5. Шероховатость поверхности трения элементов трибосопряжения колодка из резины 8130 – ролик из стали 12X18H10T до и после испытаний: а — в пресной воде; б — в морской воде

Полученные результаты дают лишь качественное представление о том, насколько сильное влияние оказывают шероховатость поверхности и соленость воды на смачиваемость ею материалов дейдвудных подшипников. Тем не менее сравнение полученных результатов с имеющимися данными в научной литературе [6]–[9] позволяет сделать предварительные выводы относительно того, в каком направлении необходимо проводить исследования для снижения трения в дейдвудных подшипниках скольжения.

Сочетание гидрофильного полимерного материала подшипника и гидрофильной металлической облицовки является положительным обстоятельством с точки зрения обеспечения гидродинамического режима смазки в дейдвудных подшипниках скольжения, смазываемых водой, в случае, если бы такой режим был преобладающим. Однако, как отмечалось ранее, гидродинамический режим является трудно реализуемым в дейдвудных подшипниках, смазываемых водой. При этом с точки зрения обеспечения граничной смазки при работе в условиях смазывания водой сочетание в паре трения двух гидрофильных материалов, по всей видимости, не является оптимальным [8]. В данном случае целесообразно изготавливать кормовые облицовки из гидрофобного материала, а материалы дейдвудных подшипников — из гидрофильных.

При использовании капролоновых подшипников как в морской, так и пресной воде капролон останется гидрофильным как до приработки, так и после нее, если оценивать начальную шероховатость капролона по табл. 2 и тенденцию изменения его шероховатости по рис. 3 и 4. При использовании резинометаллических подшипников в паре с нержавеющей сталью требование гидрофильности резины обеспечивается только при эксплуатации дейдвудного устройства в пресной воде, в морской воде резина становится гидрофобной (см. рис. 2, а). Поэтому в морской воде, по всей видимости, следует отдавать предпочтение капролону.

Требуемая гидрофобность облицовок как из оловянистой бронзы, так и из нержавеющей стали, не обеспечивается как в пресной, так и в морской воде. Для того чтобы сделать поверхность металлических облицовок гидрофобной, необходима дополнительная обработка их поверхностей, например, подобно той, которая изложена в работе [15], однако это ведет к существенному удорожанию процесса изготовления облицовок. Целесообразно изготовить облицовки из другого материала, обладающего исходно хорошими антифрикционными свойствами и выраженной гидрофобностью. Возможно применение неметаллических и композитных материалов, но при этом следует обеспечить обратную пару трения в дейдвудном сопряжении, как обладающую лучшей износостойкостью и антифрикционными свойствами по сравнению с прямыми парами². В работе [16] предлагается перейти к использованию прямой пары трения, т. е. изготавливать подшипник из металлического материала, а облицовку из капролона. Однако опыты на машине трения с прямыми парами показали их неработоспособность при нагрузках, характерных для дейдвудных подшипников, а при малых нагрузках — отсутствие положительного эффекта от применения прямых пар [17].

Следует отметить, что условия эксплуатации дейдвудных подшипников не могут обеспечить идеальные условия смазывания, подобные обеспечиваемым в лабораторных условиях при испытании на машине трения. Анализ капролоновых и резинометаллических планок дейдвудных подшипников, бывших в эксплуатации (рис. 6) показал, что шероховатость их поверхности трения превышает исходную (до эксплуатации) шероховатость. Шероховатость измеряли по той же методике, что и у образцов, испытываемых на машине трения; движения шупа осуществляли вдоль планки. Так, у капролоновых планок для районов, обозначенных на рис. 6, а цифрами 1–3, параметр R_a равен, соответственно, 2,311; 3,142 и 3,349 мкм, а у резинометаллической планки для районов 1–3 (см. рис. 6, б), соответственно, 3,388; 1,250 и 1,029 мкм. При этом на резинометаллических планках виден район 4, являющийся, по сути, показателем износа вследствие образования роликов [18]. Такой вид износа появляется, если коэффициент трения между эластомером и металлической поверхностью очень большой, что может происходить при нарушении режима смазывания. Шероховатость в местах отделения тонких слоев резины при скатывании их в ролики соответствует

² Понятия обратной и прямой пары трения используются в данной статье в соответствии с определениями, приведенными в работах Д. Н. Гаркунова.

$R_a = 4,212$ мкм, что существенно выше, чем в районах 1–3, в которых реализуется адгезионное (нормальное) изнашивание, что указывает на отрывной характер разрушения в районе 4.

а)



б)



Рис. 6. Изношенная поверхность деталей дейдвудных подшипников, бывших в эксплуатации:
а — капролоновой планки; б — резинометаллической планки

Вид функций отклика (см. рис. 2, а, б) и значения параметра R_a капролоновых и резинометаллических планок дейдвудных подшипников, приведенных на рис. 6, свидетельствуют о том, что изменения шероховатости капролона и резины в эксплуатации не оказывают влияния на их гидрофильные свойства.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. В кормовых дейдвудных подшипниках, смазываемых водой, сложно обеспечить гидродинамический режим смазки, особенно в начальный период эксплуатации, когда полной приработки еще не произошло, так как вода имеет сравнительно низкую вязкость, а фактические давления распределяются по поверхности трения подшипника очень неравномерно из-за действия силы тяжести гребного винта.

2. Для режима граничной смазки при использовании воды представляется перспективным сочетание гидрофильного полимерного материала подшипника с выраженным гидрофобным материалом облицовки гребного вала.

3. Как при увеличении солёности, так и при увеличении шероховатости происходит умеренное увеличение гидрофильности капролона.

4. Для резины шероховатость поверхности имеет слабое влияние на смачиваемость водой. При этом содержание солей в воде оказывает очень сильное влияние на смачиваемость: если в пресной воде резина проявляет выраженные гидрофильные свойства, то в морской воде она становится гидрофобной, т. е. в морской воде, по всей видимости, в качестве материала дейдвудного подшипника следует отдавать предпочтение капролону.

5. На смачиваемость металлических материалов облицовок гребных валов содержание солей в морской воде оказывает слабое влияние, тогда как от шероховатости поверхности смачиваемость зависит более заметно, при этом для бронзы зависимость смачиваемости от шероховатости более сильная, чем для стали. Существует значение параметра R_a , при котором смачиваемость проходит через максимум: для бронзы максимум смачиваемости достигается при $R_a \approx 1,0$ мкм, а для нержавеющей стали — при $R_a \approx 0,4$ мкм, т. е. гидрофобность облицовок как из оловянистой бронзы, так и из нержавеющей стали не обеспечивается ни в пресной, ни в морской воде.

6. Целесообразно провести исследования по замене при производстве облицовок оловянистой бронзы и нержавеющей стали на иной материал, обладающий выраженными гидрофобными свойствами. При этом следует сохранить тип сопряжения в дейдвудном подшипнике, соответствующий обратной паре трения (мягкий вкладыш подшипника, твердая облицовка).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лысенков П. М.* Экологически чистая трибосистема судового движительного комплекса / П. М. Лысенков // Трение, износ, смазка. — 2019. — Т. 21. — № 80.
2. *Ахматов А. С.* Молекулярная физика граничного трения / А. С. Ахматов. — М.: Физматгиз, 1963. — 472 с.
3. *Мышкин Н. К.* Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии / Н. К. Мышкин, М. И. Петроковец. — М.: Физматлит, 2007. — 368 с. — EDN RXGTLN.
4. *Litwin W.* Experimental research on marine oil-lubricated stern tube bearing / W. Litwin // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. — 2019. — Vol. 233. — Is. 11. — Pp. 1773–1781. DOI: 10.1177/1350650119846004.
5. *Мамонтов В. А.* Анализ износов капролоновых втулок дейдвудных подшипников гребного вала / В. А. Мамонтов, А. И. Миронов, Ч. А. Кужахметов, А. А. Халявкин // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2012. — № 1. — С. 30–35. — EDN OPZQUT.
6. *Schirber M.* Why Wetting a Surface Can Increase Friction / M. Schirber // American Physical Society: Physics. — 2022. — Vol. 15. — Is. 196 — Pp. 1–2. DOI: 10.1103/Physics.15.196.
7. *Peng L.* Nonmonotonic Friction due to Water Capillary Adhesion and Hydrogen Bonding at Multiasperity Interfaces / L. Peng, Liang // Phys. Rev. Lett. — 2022. — Vol. 129. — Pp. 256101. DOI: 10.1103/PhysRevLett.129.256101.
8. *Borruto A.* Influence of surface wettability on friction and wear tests / A. Borruto, Borruto // Wear. — 1998. — Vol. 222. — Is. 1. — Pp. 57–65. DOI: 10.1016/S0043-1648(98)00256-7.
9. *Zhang Z.* Tribological performance of microstructured surfaces with different wettability from superhydrophilic to superhydrophobic / Z. Zhang, Zhihui // Biosurface and Biotribology. — 2020. — Vol. 6. — Is. 4. — Pp. 118–123. DOI: 10.1049/bsbt.2020.0023.
10. *Табенкин А. Н.* Шероховатость, волнистость, профиль. Международный опыт / А. Н. Табенкин, С. Б. Тарасов, С. Н. Степанов. — СПб.: СПб. политехн. ун-т Петра Великого, 2007. — 136 с. — EDN QNBRTD.
11. *Cavanaugh G. M.* Formulae and Methods VI. / G. M. Cavanaugh. — Woods Hole, MA: The Marine Biological, 1975. — 84 p.
12. *Мур Д.* Основы применения трибоники / Д. Мур. — М.: Мир, 1987. — 487 с.
13. *Львовский Е. Н.* Статистические методы построения эмпирических формул / Е. Н. Львовский. — М: Высшая школа, 1988. — 239 с.
14. *Hald A.* Statistical Theory with Engineering Applications / A. Hald. — N. Y.: Willey, 1952. — 783 p.
15. *Conradi M.* Wettability and friction control of a stainless steel surface by combining nanosecond laser texturing and adsorption of superhydrophobic nanosilica particles / M. Conradi, A. Drnovšek, P. Gregorčič // Scientific Reports. — 2018. — Vol. 8. — Is. 1. — Pp. 7457. DOI:10.1038/s41598-018-25850-6.
16. *Прокудин, В. Г.* Применение капролона для облицовок гребных валов / В. Г. Прокудин, В. А. Черепнин, Д. Л. Грингауз, Э. П. Молодецкий // Экспресс-информация: Серия «Судоремонт». — 1983. — № 17 (506). — С. 15–20.
17. *Цветков Ю. Н.* Механизм трения капролона по оловянистой бронзе в условиях граничной смазки / Ю. Н. Цветков, К. Е. Журавлева // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 745–756. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-745-756. — EDN RJWMKW.
18. *Hakami F.* Developments of rubber material wear in conveyer belt system / F. Hakami, A. Pramanik, N. Ridgway, AK. Basak // Tribology International. — 2017. — Vol. 111. — Pp. 148–158. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.03.010.

REFERENCES

1. Lysenkov, P. M. “Ekologicheski chistaya tribosistema sudovogo dvizhitel'nogo kompleksa.” *Trenie, iznos, smazka* 21.80 (2019): 24–36.

2. Akhmatov, A. S. *Molekulyarnaya fizika granichnogo treniya* M.: Fizmatgiz, 1963: 472.
3. Myshkin, N. K. and M. I. Petrokovets. *Trenie, smazka, iznos. Fizicheskie osnovy i tekhnicheskie prilozheniya tribologii* Moskva: Fizmatlit, 2007: 368.
4. Litwin, W. “Experimental research on marine oil-lubricated stern tube bearing.” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* 233.11 (2019): 1773–1781. DOI: 10.1177/1350650119846004.
5. Mamontov, V. A., A. I. Mironov, Ch. A. Kuzhakhmetov and A. A. Khalyavkin “Analiz iznosov kaprolonovykh vtukok deydvudnykh podshipnikov grebnogo vala.” *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya* 1. (2012): 30–35.
6. Schirber, M. Why “Wetting a Surface Can Increase Friction.” *American Physical Society: Physics* 15.196 (2022): 1–2. DOI: 10.1103/Physics.15.196.
7. Peng, L. and Liang “Nonmonotonic Friction due to Water Capillary Adhesion and Hydrogen Bonding at Multiasperity Interfaces.” *Phys. Rev. Lett.* 129. (2022): 256101. DOI: 10.1103/PhysRevLett.129.256101.
8. Borruto, A. and Borruto “Influence of surface wettability on friction and wear tests.” *Wear* 222.1 (1998): 57–65. DOI: 10.1016/S0043-1648(98)00256-7.
9. Zhang, Z. and Zhihui “Tribological performance of microstructured surfaces with different wettability from superhydrophilic to superhydrophobic.” *Biosurface and Biotribology* 6.4 (2020): 118–123. DOI: 10.1049/bsbt.2020.0023.
10. Tabenkin, A. N., S. B. Tarasov and S. N. Stepanov. *Sherokhovatost', volnistost', profil'. Mezhdunarodnyy opyt* Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskiy politekhnicheskii universitet Petra Velikogo, 2007: 136.
11. Cavanaugh G. M. *Formulae and Methods VI*. Woods Hole, MA: The Marine Biological, 1975.
12. Moore, D. F. *Principles and Applications of Tribology*. Oxford: Pergamon Press, 1975.
13. L'vovskiy, E. N. *Statisticheskie metody postroeniya empiricheskikh formul*. M: Vysshaya shkola, 1988: 239.
14. Hald A. *Statistical Theory with Engineering Applications*. New York: Willey, 1952.
15. Conradi, M., A. Drnovšek and P. Gregorčič “Wettability and friction control of a stainless steel surface by combining nanosecond laser texturing and adsorption of superhydrophobic nanosilica particles.” *Scientific Reports* 8.1 (2018): 7457. DOI:10.1038/s41598-018-25850-6.
16. Prokudin, V. G., V. A. Cherepnin, D. L. Gringauz and E. P. Molodetskiy. “Primeneniye kaprolona dlya oblitsovok grebnykh valov.” *Express-informatsiya: Seriya “Sudoremont”* 17 (506) (1983):15–20.
17. Tsvetkov, Yu. N. and K. E. Zhuravleva “Mekhanizm treniya kaprolona po olovyanistoy bronze v usloviyakh granichnoy smazki.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 12.4 (2020): 745–756. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-745-756.
18. Hakami, F., A. Pramanik, N. Ridgway and AK. Basak “Developments of rubber material wear in conveyer belt system.” *Tribology International* 111. (2017): 148–158. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.03.010.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Цветков Юрий Николаевич —
доктор технических наук, профессор,
Государственный университет морского
и речного флота имени адмирала С. О. Макарова,
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7,
e-mail: yuritsvet@mail.ru

Павлова Кристина Дмитриевна —
инженер-конструктор 3-й категории,
АО ЦКБ «Айсберг»,
199034, Санкт-Петербург, В. О., Большой пр., 36,
e-mail: pavlovakristina790@gmail.com

Светловская Арина Станиславовна —
инженер-технолог,
ООО «СпецМорСервис»,
198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская 10, к. 6
e-mail: kiddag@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tsvetkov Yuriy Nikolayevich —
Dr. of Technical Sciences,
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping (SUMIS),
d.5/7, ul. Dvinskaya, Saint-Petersburg, 198035, Russia.
e-mail: yuritsvet@mail.ru

Pavlova Kristina Dmitrievna —
designer engineer of 3-rd category,
Joint-Stock Company «Central Design Bureau «Iceberg»»,
36, V.O., Bolshoy pr., Saint-Petersburg, 199034, Russia
e-mail: pavlovakristina790@gmail.com

Svetlovskaya Arina Stanislavovna —
manufacturing engineer, Specmorservice Ltd. Co,
office 810, 10/3, Dvinskaya str., Saint-Petersburg,
198035, Russia,
e-mail: kiddag@mail.ru

Статья поступила в редакцию 10 декабря 2024 г.
Received: Dec. 10, 2024.