

## СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-745-756

### FRICITION MECHANISM OF POLYAMIDE-6 AGAINST TIN BRONZE UNDER THE BOUNDARY LUBRICATION CONDITIONS

**Y. N. Tsvetkov, K. E. Zhuravleva**

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,  
St. Petersburg, Russian Federation

*The friction of polyamide-6 against tin bronze BrO5Tz5S5 is investigated. The experiments on a friction machine MI-1 according to the scheme of «a stationary ring against a rotating roller» arranged by both direct and reverse friction pair are carried out. The reverse pair is tested under both water lubrication and dry condition, whereas the direct pair is tested just under water lubrication. The lubrication is implemented by partially immersing the roller into the tray filled with fresh water. At first every friction pair underwent breaking-in with the load equal to that taking place on the surface of real stern-tube bearings during their breaking-in. Then the friction moment is recorded at different loads. When dealing with dry friction, the breaking-in, however, is implemented under water lubrication condition mentioned above, then the roller and the ring are dried thoroughly with paper napkins and fixed again exactly on the previous position. It turned out that friction in polyamide-tin bronze pair under boundary lubrication with water does not depend on the initial roughness of both polyamide and bronze element. And the friction does not depend on the friction scheme (direct or reverse pair) either. Even at comparatively high pressure, characteristic for the real stern-tube bearings breaking-in, the water comes in between the rubbing surfaces. The friction under lubrication condition is caused completely by adhesion, which, in its turn, results from dispersion interaction between adsorbed water films (under water lubrication) or immediately rubbing surfaces (under dry condition). Application of water reduces the friction by 25 % compared to the dry friction.*

*Keywords: stern-tube bearing, friction machine, polyamide, tin bronze, fresh water, boundary lubrication, hydrodynamic lubrication, friction, wear, roughness, adhesion.*

**For citation:**

Tsvetkov, Yuriy N., and Kseniya E. Zhuravleva. "Friction mechanism of polyamide-6 against tin bronze under the boundary lubrication conditions." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 12.4 (2020): 745–756. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-745-756.

**УДК 621.89 + 620.179.1**

### МЕХАНИЗМ ТРЕНИЯ КАПРОЛОНА ПО ОЛОВЯНИСТОЙ БРОНЗЕ В УСЛОВИЯХ ГРАНИЧНОЙ СМАЗКИ

**Ю. Н. Цветков, К. Е. Журавлева**

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

*Рассмотрены результаты проведенного испытания пары трения: капролон – бронза BrO5Ц5C5. Отмечается, что опыты были проведены на машине трения МИ-1 по схеме «неподвижное кольцо – вращающийся ролик» как на прямой, так и на обратной парах трения. Обратную пару испытывали в условиях смазывания водой и при трении «всухую», прямую — только при смазывании водой. Смазывание выполняли частичным погружением вращающегося роликового образца в ванночку с водой. В каждом опыте сначала осуществляли приработку пары трения в условиях смазывания водой, при этом нагрузку выбирали соответствующей фактическим показателям давления в действующих подшипниках, имеющим место на стадии их приработки. После приработки выполняли регистрацию момента трения при различных нагрузках на пару трения. В опытах без смазки после приработки образцы предварительно тщательно высушивали с помощью бумажных салфеток и устанавливали в прежнее положение с помощью*

специального приспособления. В ходе проведения эксперимента было выявлено, что трение в сопряжении капролон – оловянистая бронза в режиме граничной смазки при смазывании водой нечувствительно к исходной шероховатости бронзовой и капролоновой поверхности и не зависит от того, по какой схеме — обрточной или прямой пары — организована работа сопряжения. Даже при давлениях на площади контакта, характерных для режима приработки дейдвудных капролоновых подшипников, вода надежно поступает в зону трения. Установлено, что трение при граничной смазке практически полностью обусловлено адгезионной составляющей, которая, в свою очередь, определяется дисперсионным взаимодействием между адсорбированными на трущихся поверхностях пленками воды (при работе в воде) или непосредственно между трущимися поверхностями (при работе «всухую»). Отмечается, что применение воды снижает коэффициент трения примерно на 25 %.

*Ключевые слова:* дейдвудный подшипник, машина трения, капролон, оловянистая бронза, пресная вода, граничная смазка, гидродинамическая смазка, трение, износ, шероховатость, адгезия.

**Для цитирования:**

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 имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 745–756. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-745-756.

### Введение (Introduction)

Дейдвудное устройство, являясь одним из самых важных судовых устройств, относится при этом к наиболее часто повреждаемым объектам судна [1]. От работы дейдвудного подшипника в паре с шейкой гребного вала зависит не только безопасность плавания судна, но и эффективность эксплуатации судовой энергетической установки. В настоящее время применяются дейдвудные подшипники, смазываемые как маслом, так и водой [1]–[3]. Несмотря на ряд преимуществ дейдвудных подшипников, смазываемых маслом [2], по сравнению с дейдвудными подшипниками, работающими в воде, последние имеют более широкое применение. Это обусловлено постоянным ужесточением требований к охране водной среды — утечки масла через уплотнения дейдвудных устройств, смазываемых маслом, составляют в зависимости от водоизмещения судна 1000–5000 л в год [1], [4]. В подшипниках, смазываемых водой, применяются неметаллические материалы: резины, полиамиды, углепластик и др. Тенденция более широкого применения дейдвудных подшипников, смазываемых водой, сохраняется уже в течение длительного периода времени, и работы по совершенствованию неметаллических материалов для этих подшипников ведутся постоянно [5]–[9]. Вместе с тем, по-прежнему, наиболее широкое применение для дейдвудных подшипников, изготовленных из неметаллических материалов, имеет капролон блочный (представитель полиамидов).

Известно, что вязкость воды на 2–3 порядка уступает вязкости масла. При этом капролон имеет повышенное влагопоглощение, поэтому увеличение его объема при эксплуатации в воде может достигать 6–7 % и более, что требует назначения зазоров, превышающих в несколько раз зазоры в подшипниках, работающих при смазывании маслом [10]. Правила Российского морского регистра судоходства регламентируют только условное давление на подшипник, которое определяется как отношение реакции опоры к произведению длины подшипника на его диаметр. Для материалов, работающих при смазывании водой, условное давление не должно превышать 0,25 МПа. Фактическое давление, т. е. давление на площадке контакта, может в 200 раз и более превышать условное. Это обусловлено тем, что к концу гребного вала приложена нагрузка, равная весу гребного винта, и площадь контакта облицовки гребного вала с поверхностью кормового дейдвудного подшипника в начальный период эксплуатации очень мала и практически целиком находится у кормового среза дейдвудного подшипника [11].

Таким образом, ранее изложенное ставит под сомнение возможность реализации в капролоновых дейдвудных подшипниках режима гидродинамической смазки в начальный период работы дейдвудного подшипника — в этот период эксплуатация подшипника происходит в режиме граничной смазки и сопровождается существенно большими потерями на трение и, как следствие, большим расходом топлива. Для возможности управлять этими потерями, необходимо разобрать-

ся в природе трения металла по капролону в условиях граничной смазки, в частности в том, насколько существенным является влияние шероховатости на металлической и капролоновой поверхностях на трение, и происходит ли полное выжимание пленки воды из зоны контакта в период приработки.

Целью работы является исследование механизма трения капролона по оловянистой бронзе в условиях граничной смазки.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Эксперименты проводились на модернизированной машине трения «МИ-1», позволяющей выполнять эксперименты при малых значениях нагрузки на пару трения. Испытания проводили по схеме «неподвижное кольцо – вращающийся ролик». Частота вращения ролика была равна 200 об/мин. Смазывание осуществлялось частичным погружением ролика в ванночку с водой (рис. 1).

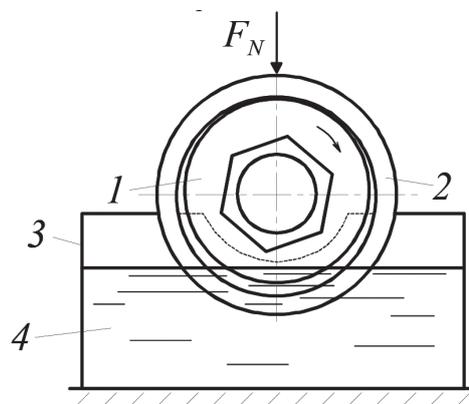


Рис. 1. Схема эксперимента:  
 1 — ролик; 2 — кольцо; 3 — ванночка; 4 — вода

Испытывали обратную и прямую пары трения [12]. В обратной паре трения кольцо было изготовлено из капролона Б марки «В», а ролик — из бронзы БрО5Ц5С5, применяемой для изготовления облицовок шеек гребных валов, работающих в паре с капролоном. Внутренний диаметр кольца был равен 50,56 мм, диаметр ролика — 49,92 мм. В прямой паре трения кольцо было изготовлено из бронзы БрО5Ц5С5, а ролик — из капролона Б марки «В». Внутренний диаметр кольца был равен 50,60 мм, диаметр ролика — 49,90 мм. Ширина колец и роликов составляла около 12 мм. Бронзовые образцы были вырезаны из одной и той же отливки (и кольцо, и ролик). Капролоновые образцы были выточены из одного и того же куска капролона (и кольцо, и ролик).

При проведении всех опытов использовали один и тот же бронзовый ролик в сочетании с одним и тем же капролоновым кольцом, а также один и тот же капролоновый ролик в сочетании с одним и тем же бронзовым кольцом. Перед каждым опытом поверхность трения роликов перешлифовывалась шкуркой № 800, а кольца просто поворачивались на некоторый угол, чтобы в следующем опыте контакт приходился на «свежее» место.

Сначала пару трения прирабатывали при нагрузке  $F_N = 294$  Н (см. рис. 1), что примерно соответствует давлению 40 МПа, — таков порядок давлений в кормовой части кормового дейдвудного подшипника при его приработке. Приработка продолжалась 60–120 мин, до примерной стабилизации момента трения. Каждый опыт заканчивали тем, что не размыкая пару трения, при разных значениях температуры в ванночке (поддерживая ее примерно постоянной, с точностью  $\pm 1,5$  °С) регистрировали момент трения при разных нагрузках, варьируемых в пределах (200...42) Н. На всех образцах измеряли шероховатость до и после испытаний. Измерения проводили с помощью прибора *MahrSurf PSI* на базовой длине 0,8 мм и длине трассирования, равной 5,6 мм.

### Анализ результатов эксперимента (Analysis of Experimental Results)

Как видно из рис. 2, при работе капролона в паре с оловянистой бронзой шероховатость поверхности трения бронзового элемента, как в обратной (рис. 2, а), так и в прямой паре трения (рис. 2, б), практически не изменяется. В то же время значение среднего арифметического отклонения профиля  $R_a$  поверхности капролонового элемента изменяется очень существенно и в процессе приработки приближается к значению  $R_a$  бронзового контртела.

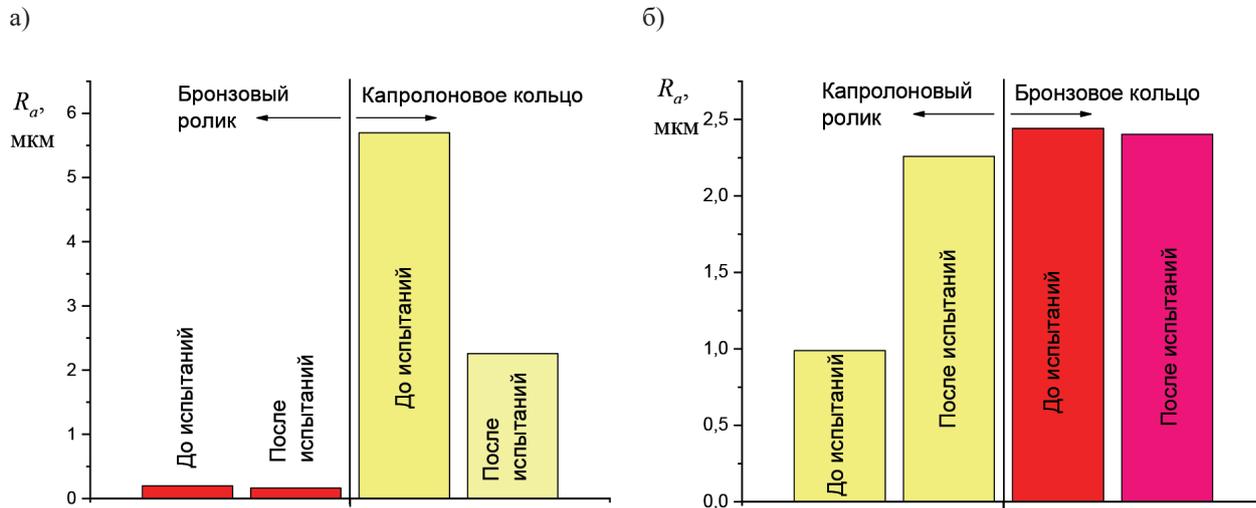


Рис. 2. Изменение шероховатости поверхности трения элементов обратной (а) и прямой (б) пары трения

В прямой паре трения шероховатость бронзового кольца является существенной и сопоставимой с шероховатостью капролонового ролика, поэтому при относительном перемещении неровности более твердой бронзовой поверхности будут деформировать поверхность капролона (рис. 3, а, где стрелками показано направление относительного перемещения поверхности ролика). Перед каждой неровностью будет формироваться зона давления ( $p_{i-1}, p_i, p_{i+1}$ ) в капролоне, которая будет перемещаться по капролону, т. е. конкретный микроробъем поверхностного слоя капролона будет испытывать периодическую *нагрузку – разгрузку*. В этом случае деформационная (гистерезисная) составляющая трения должна быть значительной.

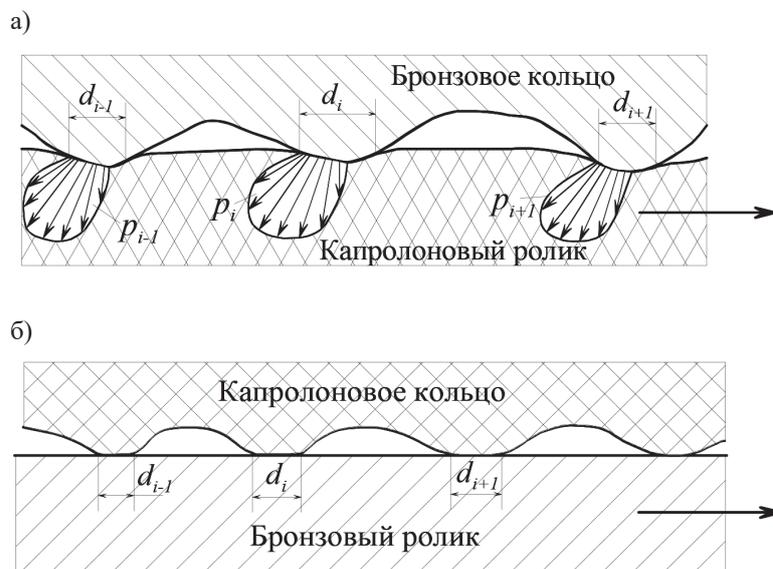


Рис. 3. Влияние шероховатости на трение полимеров по металлу при реализации прямой (а) и обратной (б) пары трения

В обратной паре трения (рис. 3, б) шероховатость капролонового кольца намного выше шероховатости бронзового ролика, поэтому гистерезисная составляющая трения [14] в обратной паре должна быть существенно ниже таковой в прямой паре трения. Т. е. трение в обратной паре определяется главным образом адгезионной составляющей: адгезионные мостики постоянно появляются и разрушаются на фактических пятнах контакта условным диаметром  $d_{i-1}$ ,  $d_i$ ,  $d_{i+1}$  и т. д.

На рис. 4 и 5 показаны примеры зависимостей силы трения (см. рис. 4, а и 5, а) и коэффициента трения (см. рис. 4, б и 5, б) от нагрузки для одного из режимов трения. Следует отметить, что характер представленных зависимостей соблюдается как для прямой (см. рис. 5), так и для обратной (см. рис. 4) пары на всех режимах трения. Как видно из рис. 4 и 5, на графиках  $T(F_N)$  и  $f(F_N)$  имеется разрыв и их можно представить в виде двух участков: А и В. Наличие разрыва указывает на то, что при определенной нагрузке происходит смена механизма, контролирующего трение. В соответствии с биномиальным законом молекулярного трения можно записать

$$\tau = \tau_0 + \beta p_r, \quad (1)$$

где  $\tau$  — сопротивление сдвигу, обусловленное слипанием поверхностей, приходящееся на единицу фактической площади контакта;  $p_r$  — давление на фактической площади контакта трущихся тел;  $\beta$  — пьезокоэффициент;  $\tau_0$  — постоянная величина.

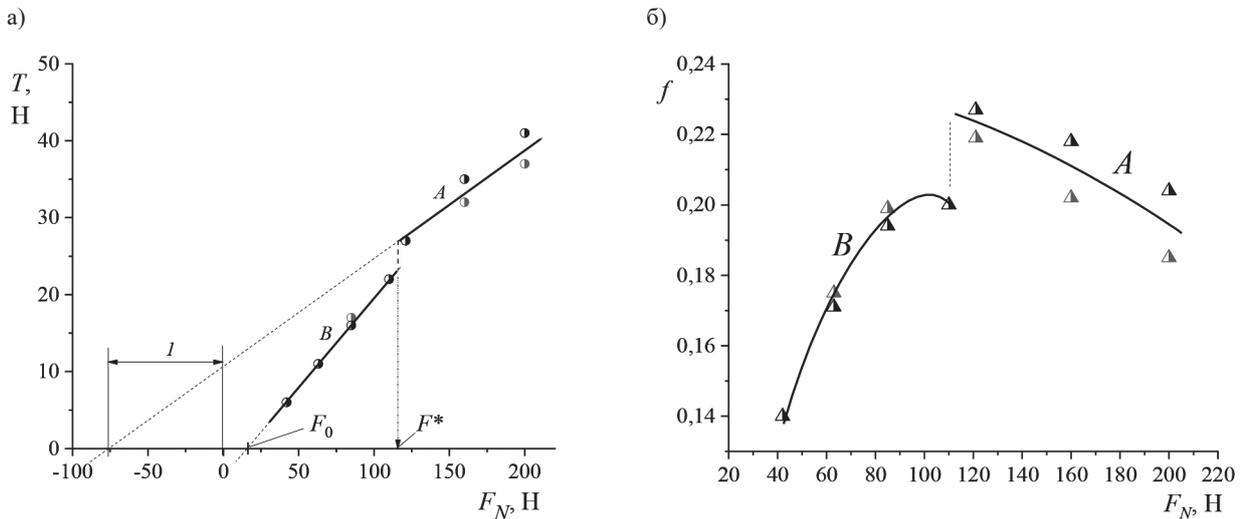


Рис. 4. Зависимость силы (а) и коэффициента (б) трения от нагрузки на пару трения: капролоновое кольцо – бронзовый ролик при смазывании водой при температуре воды 47 °С

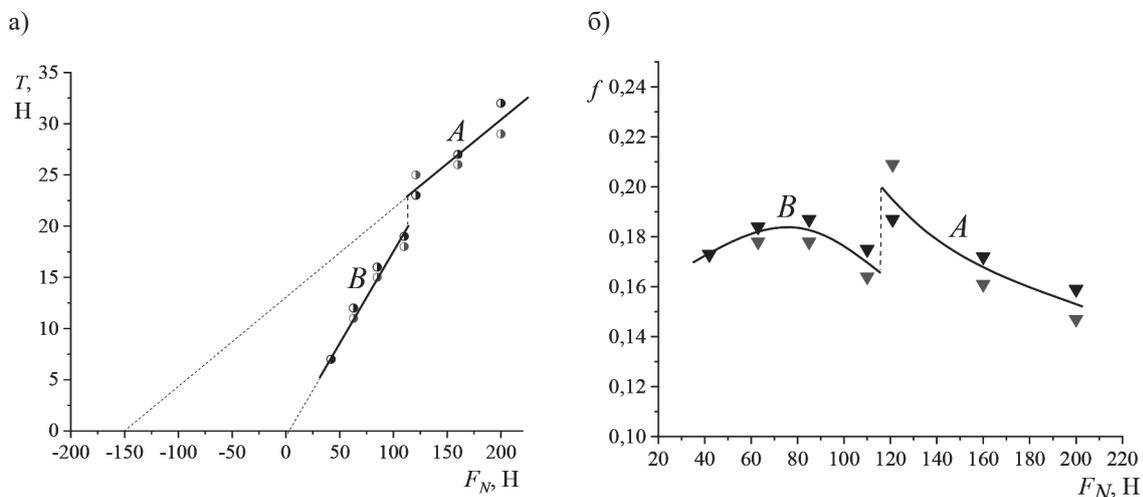


Рис. 5. Зависимость силы (а) и коэффициента (б) трения от нагрузки на пару трения: бронзовое кольцо – капролоновый ролик при смазывании водой при температуре воды 51 °С

Разделив равенство (1) на  $p_r$ , получим следующее выражение для адгезионной составляющей коэффициента трения:

$$f_a = \frac{\tau_0}{p_r} + \beta, \quad (2)$$

в котором  $f_a$  — коэффициент трения, равный  $\tau/p_r$ .

Очевидно, что

$$p_r = F_N/A_r. \quad (3)$$

Здесь  $F_N$  — нагрузка на пару трения;  $A_r$  — фактическая площадь контакта; при этом при упругом контакте

$$A_r = CF_N^m, \quad (4)$$

где  $C$  и  $m$  — постоянные величины.

Значение показателя степени  $m$  колеблется от 0 до 0,33 и зависит от того, чем обусловлен рост  $A_r$  с увеличением нагрузки: ростом площади уже существующих пятен контакта или появлением новых пятен, поскольку в контакт вступают новые неровности [7]. Для реальных поверхностей увеличение  $A_r$  обусловлено главным образом ростом количества пятен контакта, следовательно, в выражении (4) показатель степени при нагрузке близок к единице:  $m = 0,8-0,9$ .

Если адгезионная составляющая трения многократно превышает гистерезисную составляющую, то в этом случае и коэффициент трения определяется главным образом адгезионной составляющей:  $f \approx f_a$ . Тогда, последовательно подставляя выражения (3) и (4) в выражение (2) и принимая, что показатель степени  $(1 - m) \approx 0,2$ , получим

$$f \approx \frac{C\tau_0}{F_N^{0,8}} + \beta. \quad (5)$$

Поскольку величины  $C$ ,  $\tau_0$  и  $\beta$  являются постоянными для конкретных условий трения, коэффициент трения должен испытывать незначительное снижение с ростом нагрузки (см. рис. 2, б). Таким образом, убывающий характер зависимости  $f(F_N)$  указывает, что трение на участке  $A$  происходит в условиях граничной смазки.

Экстраполяцией участка  $A$  на зависимости  $T(F_N)$  до пересечения с осью абсцисс (см. рис. 4, а и 5, а) можно определить силу адгезии при трении [8]. Сила адгезии  $F_a$  по абсолютной величине равна отрезку  $l$ , отсекаемому на оси абсцисс (см. рис. 4, а). Значения адгезии были найдены при различных значениях температуры в опытах с прямой и обратной парами трения. Как видно из рис. 6, точки, соответствующие прямой и обратной парам трения, формируют единый массив данных в координатах *сила адгезии – температура воды*. При этом температура воды не оказывает влияния на адгезию, что не противоречит общим представлениям о природе адгезионных сил. В общем случае, появление сил Ван-дер-Ваальса — адгезии между поверхностями трения — объясняется разными видами взаимодействия: дисперсионным, ориентационным, индукционным и конформационным [15]. Наиболее вероятной в данном случае является дисперсионная природа сил Ван-дер-Ваальса (как известно, дисперсионное взаимодействие нечувствительно к температуре).

Расчет средневзвешенных значений коэффициентов трения в зоне граничной смазки (участок  $A$ ) показал, что их значения для прямой и обратной пары трения равны друг другу. Принимая во внимание разное значение шероховатости элементов в прямой и обратной парах трения и, как следствие, разные величины деформационной составляющей, что отмечалось ранее при анализе рис. 3, равенство коэффициентов трения в режиме граничной смазки для прямой и обратной пары трения может служить основанием для утверждения, что деформационной составляющей при трении капролона по бронзе можно пренебречь, независимо от исходной шероховатости капролона и бронзы. Это объясняется, по всей видимости, хорошим прилеганием капролона, который является термопластичным полимером, к поверхности бронзы. Подтверждением этого слу-

жит и тот факт, что, несмотря на заметный износ бронзового кольца при трении по капролоновому ролику, шероховатость бронзы, несмотря на то, что она более, чем в два раза превышает исходную шероховатость капролона, в очаге износа не изменяется, т. е. имеет место равномерный адгезионный износ всей площади контакта бронзового кольца.

Первоначально существовало предположение о том, что отрезок *B* на графиках  $T(F_N)$  соответствует смешанной смазке, т. е. когда на поверхности трущихся тел помимо участков с граничной смазкой начинают появляться участки, на которых реализуется гидродинамический режим смазки. С целью выяснения реальности данного предположения были проведены аналогичные опыты с обратной парой трения (на тех же образцах), но без смазывания водой, т. е. «всухую». В процессе проведения этих опытов также выполняли сначала приработку пары при смазывании водой при нагрузке 294 Н, затем машину трения выключали и ванночку с водой убирали. Образцы высушивали с помощью бумажных салфеток, затем устанавливали в прежнее положение с помощью специального приспособления, а затем проводили опыты «всухую» на разных нагрузках в соответствии с рядом, используемым в опытах с водой. Опыты проводили при разных температурах бронзового ролика: нагрев ролика осуществляли обдувом теплым воздухом, а контроль температуры — с помощью термопары. Таким образом, имитировали ситуацию возможного выдавливания пленок воды из зоны трения.

Как видно из рис. 6, при трении без смазки характер зависимостей  $T(F_N)$  и  $f(F_N)$  такой же, что и в условиях смазывания водой (см. рис. 4), т. е. деление зависимостей  $T(F_N)$  и  $f(F_N)$  на два участка (*A* и *B*) вызвано не сменой режима смазки, а какими-то иными причинами, связанными с природой контактного взаимодействия капролона с бронзой. Сопоставление между собой сил адгезии (рис. 7), определенных по длине отрезка *l* на зависимостях  $T(F_N)$  (см. рис. 4 и 6), показало, что при смазывании водой средняя сила адгезии  $F_a \approx 93$  Н (см. рис. 7, а), а при трении «всухую»  $F_a \approx 66$  Н (см. рис. 7, б). Более высокое значение адгезии в первом случае указывает на то, что пленки воды в режиме граничной смазки не выдавливаются из зоны контакта, т. е., фактически, в случае смазывания водой имеет место адгезия не между поверхностями капролона и бронзы, а между адсорбированными пленками воды, покрывающими поверхность этих материалов, но насколько эта пленка сплошная, непонятно.

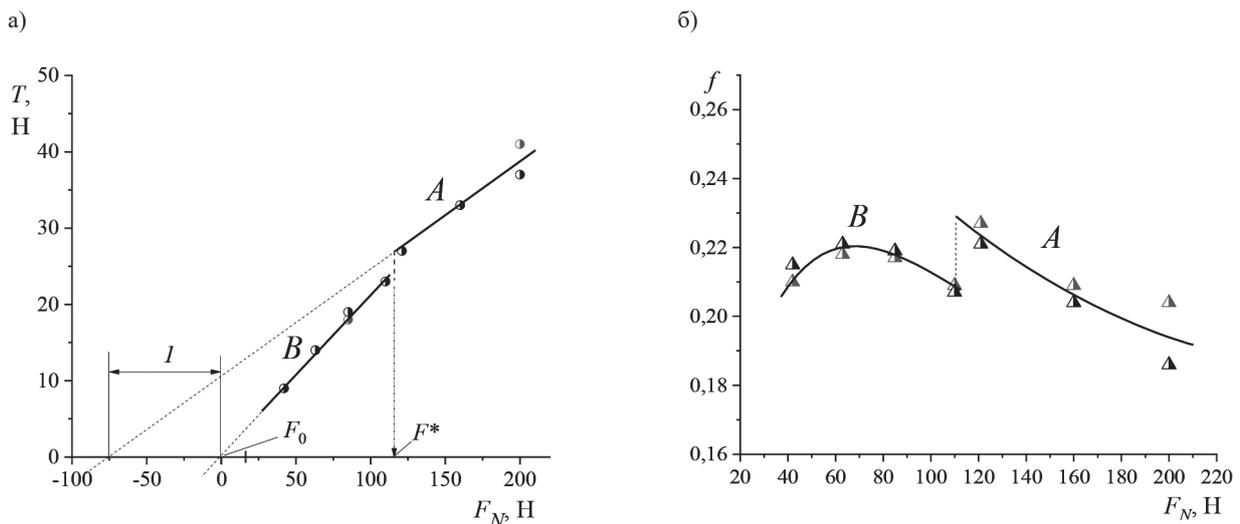


Рис. 6. Зависимость силы (а) и коэффициента (б) трения от нагрузки на пару трения капролоновое кольцо – бронзовый ролик при трении «всухую» при температуре ролика 29,5 °С

Несмотря на то, что адгезия в паре трения при смазывании водой возрастает почти в 1,5 раза по сравнению с условиями трения «всухую», значение коэффициента трения при смазывании водой снижаются примерно на 25 % по сравнению с трением без смазки (рис. 8). Последнее объясняется

тем, что значение коэффициента трения определяется прочностью адгезионных мостиков на сдвиг. В случае адгезии между пленками воды отношение прочности на разрыв к прочности на сдвиг адгезионных связей существенно выше такового в случае адгезии между капролоном и бронзой.

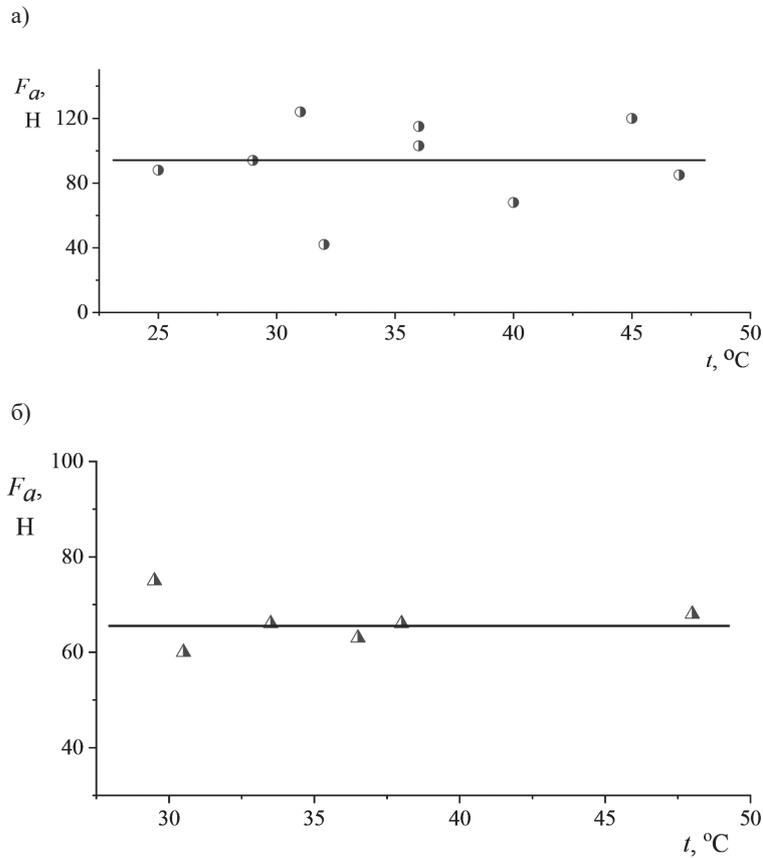


Рис. 7. Зависимость силы адгезии между элементами обратной пары трения от температуры воды при испытании с водой (а) и температуры бронзового ролика при испытании «всухую» (б)

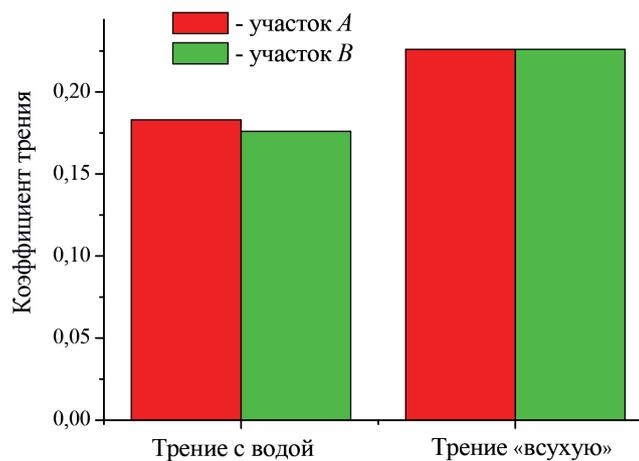


Рис. 8. Сравнение средневзвешенных значений коэффициентов трения при испытаниях обратной пары трения в условиях смазывания водой и «всухую»

Несмотря на то, что в одном случае в зоне контакта присутствуют пленки воды, а в другом — нет, разрыв между участками А и В на рис. 4 и 6 происходит при одном и том же значении

нагрузки  $F^*$ , равно примерно 115 Н (данные приведены в таблице). При этом анализ зависимостей  $f(F_N)$  (см. рис. 4, 5 и 6) показал, что имеет место именно разрыв, как будто, единую горбообразную зависимость разрезали справа от максимума и затем левую часть графика сместили вниз по отношению к правой части. Т. е. разрыв, по всей видимости, вызван упругим восстановлением капролона при уменьшении нагрузки ниже 115 Н, при этом резко снижается площадь контакта и, соответственно, силы адгезии, а появление режима смешанной смазки в зоне  $B$  в условиях смазывания водой является не причиной таких разрывов на графиках, а следствием изменений геометрии контакта. По всей видимости, при сравнительно высоких нагрузках, соответствующих отрезку  $A$ , контакт между капролоном и бронзой — полный, т. е. происходит деформация неровностей капролона и «просветы», соответствующие впадинам неровностей капролона (см. рис. 3), исчезают: поверхности покрыты только адсорбированной пленкой воды. При снижении нагрузки ниже значения  $F^*$  (см. рис. 4,  $a$  и 6,  $a$ ), из-за упругости капролона, «просветы» между выступами восстанавливаются, и в них поступает вода.

**Зависимость характерных значений  $F^*$  и  $F_0$  силы прижима элементов обратной пары трения от температуры воды при смазывании водой и температуры бронзового ролика при трении «всухую»**

Смазывание водой			Трение «всухую»		
Температура воды, °С	$F^*$ , Н	$F_0$ , Н	Температура ролика, °С	$F^*$ , Н	$F_0$ , Н
47	115	17	29,5	116	-1
36	122	14	36,5	113	-1
29	117	0	48,0	114	0
45	115	14	38,0	116	3
36	110	24	33,5	116	1
31	114	1	30,5	116	-1
40	117	-1	-	-	-
32	115	0	-	-	-
25	116	-7	-	-	-
Среднее	116	7	Среднее	115	0

В подтверждение правильности приведенных рассуждений следует сравнить значения  $F_N = F_0$ , получаемые при экстраполяции отрезка  $B$  до пересечения с осью абсцисс (см. рис. 4,  $a$  и 6,  $a$ ), в случаях трения с водой и без воды. Силу трения в режиме смешанной смазки можно представить следующим образом:

$$T = fF_{\Sigma} = f(F_a - F_{\text{гидр}} + F_N),$$

где  $f$  — коэффициент трения;  $F_{\Sigma}$  — суммарная сила, прижимающая кольцо к ролику;  $F_a$  — сила адгезии, действующая на участках фактического контакта тел;  $F_{\text{гидр}}$  — гидродинамическая (подъемная) сила, действующая на тех участках поверхности, где реализуется жидкостная смазка;  $F_N$  — внешняя сила, прижимающая кольцо к ролику, задаваемая нагрузочным устройством машины трения.

В точке пересечения экстраполированного участка отрезка  $B$  с осью абсцисс сила трения  $T = 0$ . Таким образом, в точке пересечения  $F_a - F_{\text{гидр}} + F_N = 0$ , а значит, для условий трения с водой, когда на участке  $B$  возможна реализация режима смешанной смазки, можно записать:

$$F_0 = F_{\text{гидр}} - F_a, \quad (6)$$

где  $F_0$  — значение силы  $F_N$  в точке пересечения, т. е. при  $T = 0$ .

Тогда для случая трения «всухую»  $F_{\text{гидр}} = 0$ , и выражение (6) перепишем в виде

$$F_0 = F_a, \quad (7)$$

Обработка приведенных в таблице экспериментальных данных показала, что для условий смазывания водой значение  $F_0 \approx 7$ , т. е. больше нуля, тогда для условий трения без смазки  $F_0 \approx 0$ . Таким образом, в первом случае, действительно, в зоне контакта присутствуют участки, на которых реализуется жидкостная смазка, и, как следствие, возникает подъемная сила, причем, согласно выражению (6),  $F_{\text{гидр}} > F_a$ . Однако значения подъемной силы недостаточно для обеспечения режима гидродинамической смазки. Для этого необходимо обеспечить более высокую частоту вращения ролика — на машине трения МИ-1 она равна 200 об/мин, что соответствует сравнительно невысокой линейной скорости (0,51 м/с). Во втором случае (трение без смазки) таких участков нет, при этом силы адгезии очень малы из-за малой площади контакта.

Следует отметить, что значения  $F_a$  (см. рис. 7),  $F^*$  и  $F_0$ , приведенные в таблице, в случае смазывания водой имеют существенно больший разброс, чем для условия трения «всухую», что свидетельствует о нестабильности пленок воды на поверхностях трения с точки зрения их толщины и площади покрытия. При этом значения  $F^*$  и  $F_0$  оказались так же, как и  $F_a$ , нечувствительными к температуре, несмотря на то, что, согласно ранее изложенному, температура должна оказывать на них влияние, но этот вопрос требует дальнейшего исследования.

### Выводы (Summary)

На основании проведенного эксперимента можно сделать следующие выводы:

1. Трение в сопряжении *капролон – оловянистая бронза* в режиме граничной смазки при смазывании водой не зависит от того, по какой схеме: обратной или прямой пары, организована работа сопряжения. При этом трение нечувствительно к исходной шероховатости бронзовой и капролоновой поверхностей. В процессе приработки шероховатость бронзового элемента остается прежней, а шероховатость капролонового элемента приближается к шероховатости бронзового.
2. Фактического давления, характерного для режима приработки дейдвудных капролоновых подшипников, недостаточно для предотвращения попадания воды в зону трения, т. е. переход к режиму «сухого» трения в режиме приработки маловероятен.
3. Гистерезисной составляющей трения в сопряжении *капролон – оловянистая бронза* в режиме граничной смазки можно пренебречь, трение в указанном режиме практически полностью обусловлено адгезионной составляющей, которая, в свою очередь, определяется дисперсионным взаимодействием между адсорбированными на трущихся поверхностях пленками воды (при работе в воде) или непосредственно между трущимися поверхностями (при работе «всухую»). Смазывание водой снижает коэффициент трения примерно на 25 %.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лысенков П. М. Экологически чистая трибосистема судового движительного комплекса / П.М. Лысенков // Трение, износ, смазка. — 2019. — Т. 21. — № 80 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://tribo.ru/netcat\\_files/313/208/h\\_c910836d8f751ffdeb6e361db6902b95](http://tribo.ru/netcat_files/313/208/h_c910836d8f751ffdeb6e361db6902b95) (дата обращения: 25.02.2020).
2. 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.
3. Litwin W. Water-lubricated bearings of ship propeller shafts — problems, experimental tests and theoretical investigations / W. Litwin // Polish Maritime Research. — 2009. — Vol. 16. — Is. 4. — Pp. 41–49. DOI: 10.2478/v10012-008-0055-z.
4. Roldo L. Design and Materials Selection for Environmentally Friendly Ship Propulsion System / L. Roldo, I. Komar, N. Vulić // Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering 2013. — Vol. 59. — Is. 1. — Pp. 25–31. DOI: 10.5545/sv-jme.2012.601.
5. Wu Y. Effects of Typical Physical Properties on Tribological Behaviors of Three Kinds of Polymer Materials for Water-Lubricated Bearings / Y. Wu, X. Bai, C. Yuan, C. Dong, L. Zhang, S. Liu // Tribology Transactions. — 2019. — Vol. 62. — Is. 6. — Pp. 1019–1028. DOI: 10.1080/10402004.2019.1640916.

6. Guo Z. Study on influence of micro convex textures on tribological performances of UHMWPE material under the water-lubricated conditions / Z. Guo, X. Xie, C. Yuan, X. Bai, // *Wear*. — 2019. — Vol. 426–427. — Pp. 1327–1335. DOI: 10.1016/j.wear.2019.01.010.

7. Fuming K. Tribological Properties of Nitrile Rubber/UHMWPE/Nano-MoS<sub>2</sub> Water-Lubricated Bearing Material Under Low Speed and Heavy Duty / K. Fuming, Z. Xincong, H. Jian, Z. Xiaoran, W. Jun // *Journal of Tribology*. — 2018. — Vol. 140. — Is. 6. DOI: 10.1115/1.4039930.

8. Gebretsadik D. W. Friction and wear characteristics of PA 66 polymer composite/316L stainless steel tribopair in aqueous solution with different salt levels / D. W. Gebretsadik, J. Hardell, B. Prakash // *Tribology International*. — 2020. — Vol. 141. — Pp. 105917. DOI: 10.1016/j.triboint.2019.105917.

9. Григорьев А. К. Стендовые испытания подшипника скольжения из антифрикционного материала Торплас фирмы «Thordon Bearings Inc.» / А. К. Григорьев, В. Н. Звягинцев // *Вопросы материаловедения*. — 2006. — № 2 (46). — С. 166–172.

10. 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.

11. Рубин М. Б. Подшипники в судовой технике: справ / М. Б. Рубин, В. Е. Бахарева. — Л.: Судостроение, 1987. — 344 с.

12. Гаркунов Д. Н. Триботехника (конструирование, изготовление и эксплуатация машин) / Д. Н. Гаркунов. — М.: Изд-во МСХА, 2002. — 632 с.

13. Крагельский И. В. Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. — М.: Машиностроение, 1977. — 526 с.

14. Мур Д. Основы и применения трибоники / Д. Мур. — М.: Мир, 1978. — 487 с.

15. Ахматов А. С. Молекулярная физика граничного трения / А. С. Ахматов. — М.: Физматгиз, 1963. — 472 с.

## REFERENCES

1. Lysenkov, P. M. “Ekologicheskii chistaya tribosistema sudovogo dvizhitel'nogo kompleksa.” *Trenie, iznos, smazka* 21.80 (2019). Web. 25 Feb. 2020 <[http://tribo.ru/netcat\\_files/313/208/h\\_c910836d8f751ffdeb6e361db6902b95](http://tribo.ru/netcat_files/313/208/h_c910836d8f751ffdeb6e361db6902b95)>.

2. Litwin, Wojciech. “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.

3. Litwin, Wojciech. “Water-lubricated bearings of ship propeller shafts-problems, experimental tests and theoretical investigations.” *Polish Maritime Research* 16.4 (2009): 41–49. DOI: 10.2478/v10012-008-0055-z.

4. Roldo, Liane, Ivan Komar, and Nenad Vulić. “Design and materials selection for environmental friendly ship propulsion system.” *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering* 59.1 (2013): 25–31. DOI:10.5545/sv-jme.2012.601.

5. Wu, Yuhang, Xiuqin Bai, Chengqing Yuan, Conglin Dong, Liyuan Zhang, and Shutian Liu. “Effects of Typical Physical Properties on Tribological Behaviors of Three Kinds of Polymer Materials for Water-Lubricated Bearings.” *Tribology Transactions* 62.6 (2019): 1019–1028. DOI: 10.1080/10402004.2019.1640916.

6. Guo, Zhiwei, Xin Xie, Chengqing Yuan, and Xiuqin Bai. “Study on influence of micro convex textures on tribological performances of UHMWPE material under the water-lubricated conditions.” *Wear* 426-427 (2019): 1327–1335. DOI: 10.1016/j.wear.2019.01.010.

7. Fuming, Kuang, Zhou Xincong, Huang Jian, Zhou Xiaoran, and Wang Jun. “Tribological Properties of Nitrile Rubber/UHMWPE/Nano-MoS<sub>2</sub> Water-Lubricated Bearing Material Under Low Speed and Heavy Duty.” *Journal of Tribology* 140.6 (2018). DOI: 10.1115/1.4039930.

8. Gebretsadik, Daniel W., Jens Hardell, and Braham Prakash. “Friction and wear characteristics of PA 66 polymer composite/316L stainless steel tribopair in aqueous solution with different salt levels.” *Tribology International* 141 (2020): 105917. DOI: 10.1016/j.triboint.2019.105917.

9. Grigoryev, A. K., and V. N. Zvyagintsev. “The bench tests of slide bearing made from the antifricition material torplas of the company “Thordon Bearings Inc.”” *Inorganic Materials: Applied Research* 2(46) (2006): 166–172.

10. Mamontov, Victor Andreevich, Alfred Ivanovich Mironov, Chingiz Asanovich Kuzhakhmetov, and Alexey Aleksandrovich Khalyavkin. “Wear analysis of polycaprolactam bushings of deadwood bearings of the propeller shaft.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 1 (2012): 30–35.

11. Rubin, M. B., and V. E. Bakhareva. *Podshipniki v sudovoi tekhnike: Spravochnik*. L.: Sudostroenie, 1987.
12. Garkunov, D. N. *Tribotekhnika (konstruirovaniye, izgotovleniye i ekspluatatsiya mashin)*. M.: Izd-vo MSKhA, 2002.
13. Kragel'skii, I. V., M. N. Dobychin, and V. S. Kombalov. *Osnovy raschetov na treniye i iznos*. M.: Mashinostroeniye, 1977.
14. Moore, D. F. *Principles and Applications of Tribology*. Oxford: Pergamon Press, 1975.
15. Akhmatov, A.S. *Molekulyarnaya fizika granichnogo treniya*. M.: Fizmatgiz, 1963.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Цветков Юрий Николаевич** —  
доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация,  
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [yuritsvet@mail.ru](mailto:yuritsvet@mail.ru), [ZvetkovUN@gumrf.ru](mailto:ZvetkovUN@gumrf.ru)  
**Журавлева Ксения Евгеньевна** —  
инженер-технолог  
ЗАО «Канонерский судоремонтный завод»  
198184, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
Канонерский остров, 41  
e-mail: [xenia.cher97@gmail.ru](mailto:xenia.cher97@gmail.ru), [kaf\\_tsr@gumrf.ru](mailto:kaf_tsr@gumrf.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Tsvetkov, Yuriy N.** —  
Dr. of Technical Sciences, professor  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [yuritsvet@mail.ru](mailto:yuritsvet@mail.ru), [ZvetkovUN@gumrf.ru](mailto:ZvetkovUN@gumrf.ru)  
**Zhuravleva, Kseniya E.** —  
Process engineer  
JSC “Kanonersky Shiprepairing Yard”  
41 Kanonersky ostrov, St. Petersburg, 198184,  
Russian Federation  
e-mail: [xenia.cher97@gmail.ru](mailto:xenia.cher97@gmail.ru), [kaf\\_tsr@gumrf.ru](mailto:kaf_tsr@gumrf.ru)

*Статья поступила в редакцию 20 июня 2020 г.  
Received: June 20, 2020.*