

ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ЖЕСТКОСТЬ РЫБОЛОВНЫХ КРУЧЕНЫХ ИЗДЕЛИЙ¹

*А. А. Недоступ, К. В. Коновалова, П. В. Насенков,
А. О. Ражнев, Б. А. Альтишуль, С. В. Федоров*

*Калининградский государственный технический университет,
Калининград, Российская Федерация*

Рассматривается проблема физического моделирования рыболовных крученых нитевидных материалов в части обоснования правил подбора относительной продольной, изгибной и крутильной жесткости нитевидных изделий (НИ). Постановка задачи связана со сложностями проведения натурных экспериментов при проектировании новых орудий промышленного рыболовства, а также с отсутствием систематических опытов по измерению жесткости синтетических канатно-веревочных изделий (КВИ). В связи с этим возникает необходимость в проведении модельных экспериментов, связанных с физическим моделированием динамических процессов, которые протекают в НИ и КВИ при нагрузке. Произведен расчет коэффициента пропорциональности – изгибной жесткости, – определяющего способность НИ и КВИ сопротивляться изгибу. Приведены выражения, определяющие комбинацию отношения изгибной жесткости к продольной жесткости и безразмерную комбинацию отношения изгибной жесткости к крутильной жесткости. Исследование позволит спрогнозировать поведение и основные свойства (диаметр, плотность, прочность, относительное удлинение и пр.) современных синтетических нитевидных рыболовных материалов на этапе их создания (проектирования).

Ключевые слова: промышленное рыболовство, синтетические нитевидные изделия, физико-механические свойства, нагрузка, изгибная жесткость, продольная жесткость, крутильная жесткость, канат, масса, линейная плотность, диаметр, длина.

Для цитирования: Недоступ А. А., Коновалова К. В., Насенков П. В., Ражнев А. О., Альтишуль Б. А., Федоров С. В. Относительная жесткость рыболовных крученых изделий // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2020. № 1. С. 46–60. DOI: 10.24143/2073-5529-2020-1-46-60.

Введение

Орудия промышленного рыболовства изготовлены из рыболовных крученых изделий – ниток (нитяные изделия – НИ), веревок и канатов (канатно-веревочные изделия – КВИ). Все НИ и КВИ представляют собой, с точки зрения механики, гибкие нити [1–3].

Примером распределенных нагрузок НИ и КВИ является собственный их вес или распределенная нагрузка по их длине (гидродинамическое сопротивление), но также нельзя забывать о растяжении и эластичности НИ и КВИ [4–6]. Нагрузки (или их часть), направленные перпендикулярно к НИ и КВИ, вызывают их изгиб; направленные вдоль НИ и КВИ вызывают растяжение или сжатие. Задачей теории изгиба гибких стержней НИ и КВИ является определение прогиба, НИ и КВИ под нагрузками, а также напряжений и деформаций в материале НИ и КВИ, при этом форма, размеры, материал НИ и КВИ и внешние нагрузки считаются заданными. Затем, при расчете на прочность, задачу формулируют так: каковы должны быть размеры сечения (диаметр) НИ и КВИ, чтобы при заданных нагрузках напряжения не превышали бы допустимых значений (рис. 1).

Нитяное изделие и КВИ как конструктивный элемент орудия рыболовства обычно или закреплено концами в узлах (ячей сетного полотна), или закреплено на поводцах (секция хребтины горизонтального яруса) и т. д., или одним концом соединено с орудием рыболовства, а другим с промысловым механизмом (ваер, урез).

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Калининградской области в рамках научно-го проекта № 19-48-390004.

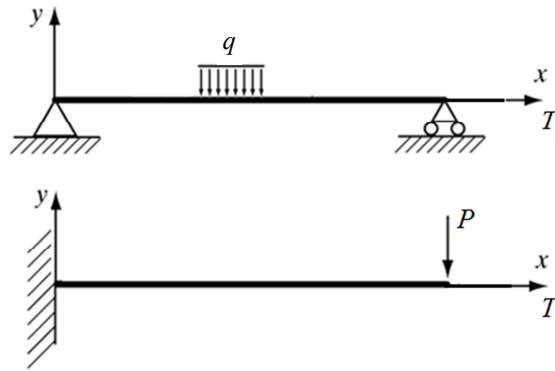


Рис. 1. Нагрузки гибкой нити НИ и КВИ:
 q – распределенная нагрузка, Н/м; P – нагрузка, Н; T – натяжение, Н

На рис. 2 приведен 3D вид разноглубинного трала, который состоит из множества НИ и КВИ, а на рис. 3 – 3D вид закидного невода и НИ и КВИ.

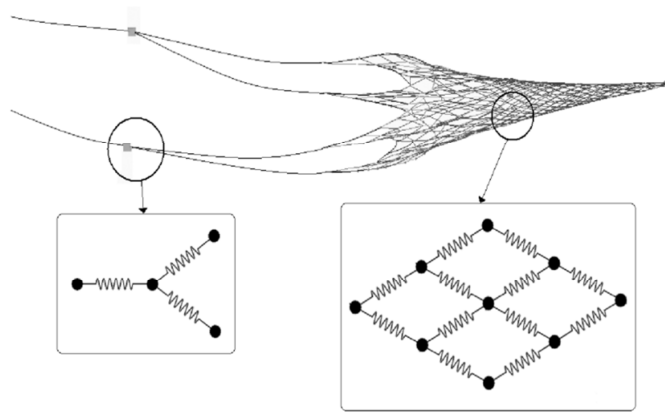


Рис. 2. Разноглубинный трал, 3D вид [7]

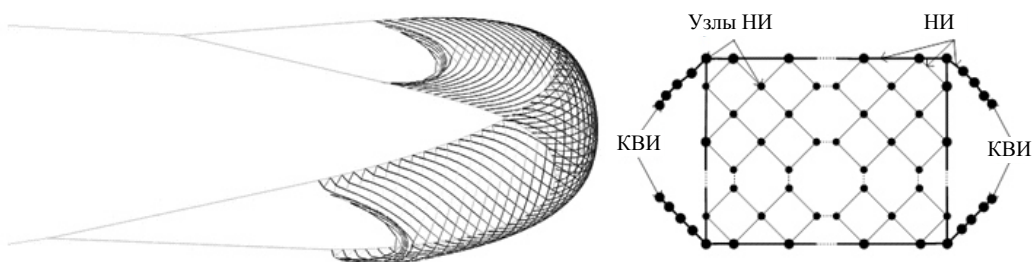


Рис. 3. Закидной невод, 3D вид [8]

Исследование и анализ изгибной жесткости EJ НИ и КВИ является актуальной задачей, решение которой обеспечит применение синтетических изделий с максимальным учетом особенностей их свойств и тем самым позволит научно обоснованно подходить к выбору материала для решения ряда эксплуатационных задач в промышленном рыболовстве. Проблема – отсутствие данных по изгибной жесткости EJ для синтетических изделий – не позволяет максимально использовать весь набор их уникальных свойств и получить оценку физико-механических

свойств при изгибе. Полученные данные предоставят возможность строить эффективные математические модели орудий лова с использованием синтетических НИ и КВИ либо позволят в дальнейшем принимать изгибную жесткость изделия за константу $EJ = \text{const}$, что не является верным и приводит к ошибке при моделировании орудий рыболовства, т. к. $EJ \neq \text{const}$.

По своему физическому смыслу изгибная жесткость является интегральной характеристикой упругих сопротивлений и сухого трения скольжения в НИ. Момент сопротивления изгибу, обусловленный силами внутреннего конструкционного трения, пропорционален кривизне, как и момент упругих сопротивлений. С увеличением кривизны возрастает подвижность элементов.

Так как при малых прогибах НИ и КВИ (справедливо для канатных связей, веревок и ниток орудий рыболовства), которые в первую очередь интересуют инженеров, кривизна кривой практически равна ее второй производной, можно записать дифференциальное уравнение

$$EJ \frac{d^2 y}{dx^2} = M(x), \quad (1)$$

где $M(x)$ – момент на конце НИ или КВИ; $d^2 y/dx^2$ – производная второго порядка кривизны кривой; y – координата по оси OY ; x – координата по оси OX .

Коэффициент пропорциональности EJ называется изгибной жесткостью, он определяет способность НИ и КВИ сопротивляться изгибу и равен произведению модуля упругости материала E изделия (НИ и КВИ) на момент инерции сечения J изделия (НИ и КВИ), который для цилиндрической гибкой нити выражается формулой

$$J = \frac{\pi d^4}{64},$$

где d – диаметр НИ и КВИ.

В работе [9] Б. И. Герман изучал жесткость сетного полотна в потоке; в [10] В. Н. Стрекалова изучала жесткость системы при задеве трала. В настоящее время доминируют работы исследователей по изучению EJ вариационными методами и МКЭ [11–13]. Таким образом, изучаются все физико-механические свойства НИ и КВИ [14, 15]. Помимо поперечной изгибной жесткости $EJ_x = EJ$ существуют продольная жесткость EA (A – площадь поперечного сечения НИ и КВИ, принимаем за $A = \pi d^2/4$; E – модуль упругости НИ и КВИ, причем НИ и КВИ – анизотропные изделия) и крутильная жесткость GJ_p (G – модуль упругости при сдвиге; $J_p = \pi d^4/32$ – полярный момент инерции) [4, 5]. Изучение жесткости НИ и КВИ актуально для построения математических моделей орудий рыболовства [16–18].

Постановка задачи

За основу исследования безразмерной жесткости НИ и КВИ возьмем методику Ю. Ф. Соколова, М. Н. Пахнова и А. И. Воцанкина «Методика оценки жесткости канатов» [19]. Исследования физико-механических свойств НИ и КВИ становятся эффективными и актуальными в настоящее время ввиду развития химической промышленности, что позволяет создавать более удобные и практичные в применении нитевидные рыболовные материалы. Данные исследования позволяют на этапе создания (проектирования) материалов спрогнозировать их поведение и основные свойства. Отнесем к физико-механическим свойствам НИ и КВИ диаметр, плотность, прочность, относительное удлинение и т. д. Представим, что НИ и КВИ подверглось продольному растяжению (рис. 4), участок НИ и КВИ имеет до растяжения следующие параметры: L – длина (примем $L = 1$ км); T_n – линейная плотность; M – масса (примем M в г), а после растяжения: $L_1 = L + \Delta L$ – длина; масса (M) не изменяется.

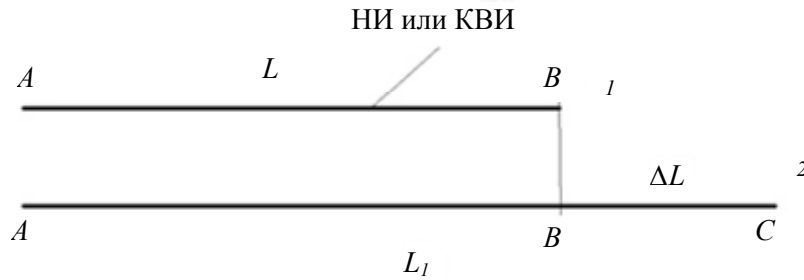


Рис. 4. Нитяное изделие и канатно-веревочное изделие до продольного растяжения (1) и после растяжения (2)

Масса НИ и КВИ не изменяется, т. е. $M = \text{const}$, приращение длины определим по выражению $L_1 = L + \Delta L$, где ΔL – приращение длины.

Для постановки задачи исследования физико-механических свойств НИ и КВИ необходимо определиться с определением величины относительного удлинения ε НИ и КВИ:

$$\begin{cases} \varepsilon = \frac{\Delta L}{L}; \\ \varepsilon = \frac{\sigma}{E}, \end{cases}$$

где σ – напряжение НИ и КВИ; E – модуль упругости (модуль Юнга).

Линейная плотность НИ и КВИ определяется исходя из выражения

$$T_n = \frac{M}{L}.$$

В связи с тем, что при растяжении НИ и КВИ изменилась его длина L_1 , а масса не изменилась ($M = \text{const}$), запишем линейную плотность НИ и КВИ до растяжения и после него. Введем допущения: масса участка ΔL постоянна, длина образующей L НИ и КВИ (или диаметр d) изменяется в каждом участке L равномерно:

$$T_n = \begin{cases} \frac{M}{L}; \\ \frac{M - \Delta M}{L}, \end{cases} \quad (2)$$

где ΔM – масса участка НИ и КВИ длиной ΔL ; $\frac{M}{L}$ – до растяжения; $\frac{M - \Delta M}{L}$ – после растяжения.

Рассмотрим линейную плотность НИ и КВИ после растяжения:

$$T_{n1} = \frac{M - \Delta M}{L} = T_n - \frac{\Delta M}{L}, \quad (3)$$

где T_n – линейная плотность НИ и КВИ до растяжения; T_{n1} – линейная плотность НИ и КВИ после растяжения.

Представим ΔM в виде

$$\Delta M = \frac{\Delta L}{L + \Delta L} M, \quad (4)$$

тогда, с учетом (4), выражение (3) представим в виде

$$T_{n1} = T_n - \left(\frac{\Delta L}{L + \Delta L} M \right) \frac{1}{L} = T_n \left(1 - \frac{\Delta L}{L + \Delta L} \right) = T_n \left(1 - \frac{1}{\left(\frac{L + \Delta L}{\Delta L} \right)} \right). \quad (5)$$

Дробь $(L + \Delta L)/\Delta L$ в выражении (5) представим в виде

$$\frac{L + \Delta L}{\Delta L} = \frac{L}{\Delta L} + 1 = \frac{1}{\varepsilon} + 1 = \frac{1 + \varepsilon}{\varepsilon},$$

тогда выражение (5) будет иметь вид

$$T_{n1} = T_n \left(1 - \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon} \right) = T_n \left(\frac{1}{1 + \varepsilon} \right). \quad (6)$$

Таким образом, линейная плотность НИ и КВИ изменяется (уменьшается) при возникновении растяжения НИ и КВИ. На основании выражения (6) возможно построить график зависимости $T_{n1} = f(\varepsilon)$ для различных НИ и КВИ вплоть до их разрыва. Для примера продемонстрируем зависимость $T_{n1} = f(\varepsilon)$ при условии $T_n = 100$ текс (рис. 5).

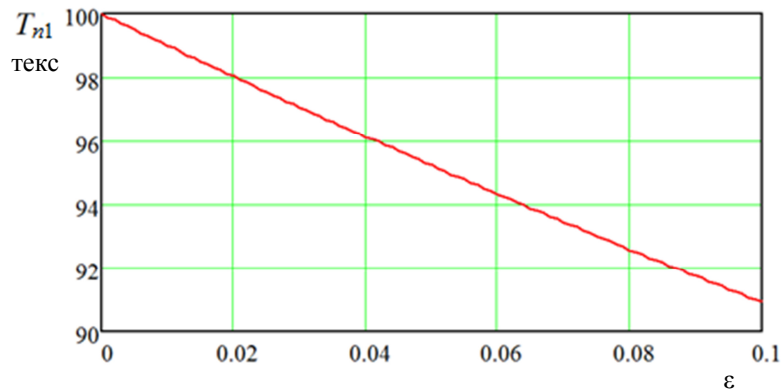


Рис. 5. Зависимость $T_{n1} = f(\varepsilon)$ НИ и КВИ при условии $T_n = 100$ текс

Из графика зависимости $T_{n1} = f(\varepsilon)$ видно, что при относительном удлинении НИ и КВИ $\varepsilon = 0,1$ (или 10 %) линейная плотность НИ и КВИ уменьшается примерно на 9 %. При $\varepsilon = 0,2$ линейная плотность НИ и КВИ уменьшается примерно на 16 %.

Представим формулу (5) в виде (для одного и того же НИ и КВИ)

$$L = \frac{M}{T_n} = \text{const}. \quad (7)$$

Формула (7) свидетельствует об изменении M пропорционально изменению T_n , что свидетельствует об изменении M по такому же закону, что и T_n , т. е. по формуле (4):

$$M_1 = M \left(1 - \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon} \right) = M \left(\frac{1}{1 + \varepsilon} \right),$$

где M – масса НИ и КВИ до растяжения; M_1 – масса НИ и КВИ после растяжения длиной L .

Таким образом, масса участка НИ и КВИ и его линейная плотность в процессе растяжения изменяются (уменьшаются) пропорционально отношению $\frac{1}{1 + \varepsilon}$.

Запишем внешний объем НИ и КВИ (представим сечение НИ и КВИ в виде окружности, это также допущение):

$$V_{\text{вн}} = \frac{Mg}{\gamma_{\phi}} = \frac{\pi d^2}{4} L, \quad (8)$$

где γ_{ϕ} – фиктивный объемный вес НИ и КВИ, вычисленный по внешнему ее объему, Н/м³; d – диаметр НИ и КВИ (внешний); g – ускорение свободного падения.

Исходя из выражения (8), определим d (при $L = 1\,000$ м):

$$d = 2 \sqrt{\frac{Mg}{\pi L \gamma_{\phi}}} = 2 \sqrt{\frac{T_n g 10^{-6}}{\pi \gamma_{\phi}}}, \quad (9)$$

а γ_{ϕ} представим в виде $\gamma_{\phi} = \rho_{\phi} g$, где ρ_{ϕ} – фиктивная плотность НИ и КВИ, которая не зависит от наполненности НИ и КВИ воздухом, тогда (9) представим в виде (при $L = 1\,000$ м)

$$d = 2 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{T_n}{\pi \rho_{\phi}}}.$$

Представим фиктивную плотность ρ_{ϕ} НИ и КВИ до растяжения, а также фиктивную плотность $\rho_{\phi 1}$ НИ и КВИ после растяжения в виде

$$\rho_{\phi} = \frac{M}{V_{\text{вн}}}; \quad \rho_{\phi 1} = \frac{M}{V_{\text{вн}1}}, \quad (10)$$

где $V_{\text{вн}1}$ – масштаб НИ и КВИ после растяжения.

В процессе растяжения НИ и КВИ изменяется объем, и фиктивная плотность $\rho_{\phi} \neq \text{const}$.

Выразим d из $V_{\text{вн}}$ и приравняем его к (8) при $L = 1\,000$ м:

$$d = 2 \sqrt{\frac{V_{\text{вн}}}{\pi L}} = 2 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{T_n}{\pi \rho_{\phi}}}$$

или при $L = 1\,000$ м

$$\frac{V_{\text{вн}}}{L} = 10^{-6} \frac{T_n}{\rho_{\phi}}, \quad (11)$$

тогда определим из (11) ρ_{ϕ} :

$$\rho_{\phi} = 10^{-6} \frac{T_n L}{V_{\text{вн}}} \cong 1,27 \cdot 10^{-6} \frac{T_n}{d^2}.$$

Изменение фиктивной плотности НИ и КВИ ($M = \text{const}$)

$$\frac{\rho_{\phi 1}}{\rho_{\phi}} = \frac{L}{L_1} \frac{d^2}{d_1^2} = \left(\frac{1}{1 + \varepsilon} \right) \left(\frac{d}{d_1} \right)^2,$$

где d_1 – диаметр НИ и КВИ после растяжения, или изменение (уменьшение) диаметра НИ и КВИ во время растяжения.

Выразим ρ – плотность материала, из которого изготовлены НИ и КВИ:

$$\rho = \frac{\rho_{\text{в}}}{1 - \frac{Q}{P_H}} = \rho_{\text{в}} \left(\frac{P_H}{P_H - Q} \right) = \rho_{\text{в}} \left(\frac{P_H}{D} \right),$$

где ρ_b – плотность воды; Q – вес в воде НИ и КВИ; P_H – вес в воздухе НИ и КВИ; D – гидростатическая сила (Архимедова сила).

Допустим, что изменение ρ в каждом участке НИ и КВИ происходит равномерно, тогда

$$\frac{\rho_1}{\rho} = \frac{P_{H1} D}{P_H D_1} = \frac{M V_{и}}{M V_{и1}} = \frac{V_{и}}{V_{и1}}, \quad (12)$$

где ρ_1 – плотность НИ и КВИ в процессе растяжения; P_{H1} – вес в воздухе НИ и КВИ в процессе растяжения ($P_{H1} = P_H$); $V_{и}$ – истинный объем НИ и КВИ; $V_{и1}$ – истинный объем НИ и КВИ после растяжения.

В процессе растяжения НИ и КВИ примем $\rho = \text{const}$, тогда

$$\rho_1 / \rho = 1.$$

Исходя из (12) получаем выражение в виде

$$\frac{V_{и1}}{V_{и}} = \frac{\frac{\pi d_{б1}^2}{4} N_b L_1}{\frac{\pi d_b^2}{4} N_b L} = \frac{d_{б1}^2 L_1}{d_b^2 L} = \left(\frac{d_{б1}}{d_b} \right)^2 (1 + \varepsilon) = 1, \quad (13)$$

где N_b – количество волокон в НИ и КВИ; d_b – диаметр волокна НИ и КВИ; $d_{б1}$ – диаметр волокна после растяжения НИ и КВИ. В процессе растяжения объем волокна не меняется, т. е. $V_{и1} = V_{и}$, из (13) получаем:

$$\frac{d_{б1}}{d_b} = \sqrt{\frac{1}{1 + \varepsilon}}, \quad (14)$$

тогда

$$\left. \begin{aligned} \frac{\rho_{\phi 1}}{\rho_{\phi}} &= \left(\frac{1}{1 + \varepsilon} \right) \left(\frac{d}{d_1} \right)^2 \\ \frac{\rho_1}{\rho} &= \left(\frac{1}{1 + \varepsilon} \right) \left(\frac{d_b}{d_{б1}} \right)^2 = 1 \end{aligned} \right\}$$

тогда

$$\frac{\rho_{\phi 1}}{\rho_{\phi}} = \left(\frac{d_{б1}}{d_b} \right)^2 \left(\frac{d}{d_1} \right)^2 = \left(\frac{1}{1 + \varepsilon} \right) \left(\frac{d}{d_1} \right)^2 = \left(\frac{d_{б1}}{d_1} \right)^2 \left(\frac{d}{d_b} \right)^2.$$

Тогда коэффициент Пуассона для материала НИ и КВИ представим в виде

$$\mu = -\frac{\Delta d_b}{d_b} \frac{L}{\Delta L} = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon} = -\frac{(d_{б1} - d_b)}{d_b} \frac{L}{\Delta L} = \left(1 - \sqrt{\frac{1}{1 + \varepsilon}} \right) \frac{1}{\varepsilon}, \quad (15)$$

где ε_p – относительная поперечная деформация НИ и КВИ, которая определяется из выражения

$$\varepsilon_p = \frac{\Delta d_b}{d_b}, \quad (16)$$

где Δd – изменение диаметра НИ и КВИ во время растяжения до момента разрыва; d_b – диаметр волокна НИ и КВИ.

На основании выражения (14) возможно построить график зависимости $d_{б1}/d_b = f(\varepsilon)$ для различных волокон НИ и КВИ вплоть до их разрыва (рис. 6).

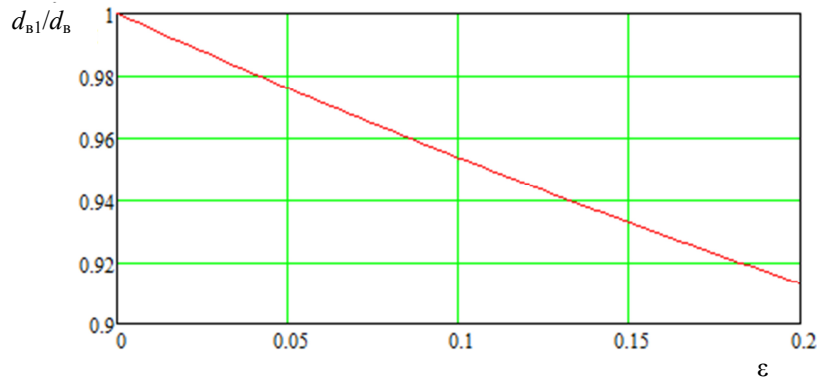


Рис. 6. Зависимость $d_{b1}/d_b = f(\varepsilon)$ НИ и КВИ

Из графика зависимости $d_{b1}/d_b = f(\varepsilon)$ видно, что при относительном удлинении НИ и КВИ $\varepsilon = 0,2$ (или 20 %) диаметр волокна НИ и КВИ d_{b1} уменьшается примерно на 9 %.

Коэффициент Пуассона для волокна НИ и КВИ остается постоянным, а фиктивный коэффициент Пуассона НИ и КВИ μ_ϕ будет равен

$$\mu_\phi = -\frac{\Delta d}{d} \frac{L}{\Delta L} = -\frac{(d_1 - d)}{d} \frac{L}{\Delta L} = \left(1 - \frac{d_1}{d}\right) \frac{L}{\Delta L}.$$

Напряжение НИ и КВИ определяется по выражению

$$\sigma = \frac{T}{A} = \frac{4T}{\pi d^2},$$

где T – сила, растягивающая НИ и КВИ; A – площадь поперечного сечения НИ и КВИ; изменение напряжения в НИ и КВИ определим через соотношение (переход к безразмерным параметрам)

$$\frac{\sigma}{\sigma_1} = \frac{T}{T_1} \left(\frac{d_1}{d}\right)^2, \quad (17)$$

где T_1 – разрывное усилие до момента разрыва НИ и КВИ.

Исходя из (17) получаем выражение в виде

$$\frac{\Sigma \sigma_{b1}}{\Sigma \sigma_b} = \Sigma \left(\frac{\sigma_{b1}}{\sigma_b} \right) = \left(\frac{\Sigma T_{b1}}{\Sigma A_{b1}} \right) / \left(\frac{\Sigma T_b}{\Sigma A_b} \right) = \Sigma \left(\frac{T_{b1}}{T_b} \frac{d_b^2}{d_{b1}^2} \right);$$

$$\sigma_{b1} / \sigma_b = (T_{b1} / T_b) (1 + \varepsilon),$$

где σ_b – напряжение в волокне НИ и КВИ; σ_{b1} – изменение напряжения в волокне НИ и КВИ; T_b – сила, растягивающая волокно; A_b – площадь сечения волокна; T_{b1} – разрывное усилие до момента разрыва; A_{b1} – изменение в площади сечения волокна.

Отметим, что вышеуказанные выражения и формулы справедливы для всех НИ и КВИ.

Материалы исследования

Вернемся к выражению (1). Относительная поперечная деформация НИ и КВИ определяется по выражению (16)

$$\varepsilon_p = \frac{\Delta d}{d},$$

где Δd – изменение диаметра НИ и КВИ во время растяжения до момента разрыва.

Запишем выражение (16) как

$$\varepsilon_p = \frac{\Delta d}{d} = \frac{d - d_1}{d} = 1 - \frac{d_1}{d}.$$

Тогда коэффициент Пуассона представим в виде

$$\mu = \varepsilon_p / \varepsilon. \quad (18)$$

Коэффициент Пуассона является постоянной величиной для одного материала, что подтверждается (18).

Введем коэффициент упругости НИ и КВИ:

$$k = 1 / E.$$

Необходимо отметить, что для НИ и КВИ, изготовленных из одного материала (к примеру, полиамид, полиэтилен и т. д.), относительное удлинение которых при разрыве $\varepsilon = \text{const}$ (при одной длине образца), $E = \text{const}$ и $k = \text{const}$ только для материала (для волокон). Что касается значений ε и k для НИ и КВИ, их предстоит определить экспериментально.

Важным вопросом в исследовании физико-химических свойств НИ и КВИ является определение значений относительного удлинения ε , а также модуля упругости E , изгибной жесткости EJ и коэффициента упругости k . Важной задачей исследования свойств НИ и КВИ является определение их изгибной поперечной и продольной жесткости, а также крутильной жесткости. Следует отметить, что важным параметром НИ и КВИ является крутка ξ [20, 21] по значению n (количество витков прядей (каболок для канатов) НИ и КВИ на 1 м, для крученых НИ и КВИ), аппроксимировав их зависимостью вида

$$n = a_1 / d,$$

где a_1 – коэффициент (для полиамида $a_1 = 0,73$ м).

Для определения относительного удлинения хлопчатобумажной нити, закрепленной за две точки на одной горизонтали так, что длина нити в ненапрянутом состоянии равна расстоянию между точками, Ф. И. Баранов предложил использовать выражение

$$\varepsilon = 0,005\sqrt{T_1},$$

где T_1 измеряется в кг [1, с. 90]

На сегодняшний день для определения модуля упругости каната в расчетах можно использовать формулы из [22] (заимствовано у стальных канатов). Условный модуль упругости НИ и КВИ определяется по формуле

$$E_{yc} = T_1 / \varepsilon A. \quad (19)$$

Исследованиями установлено [13], что модуль продольной упругости стального каната в целом ниже модуля упругости материала проволоки (на 61–88 %). На практике часто пользуются усредненными значениями E_{yc} (для стальных тросовых канатов):

$$E_{yc} = E_p \cos^4 \alpha \cos^4 \beta, \quad (20)$$

где E_p – модуль упругости стальной канатной проволоки; α , β – углы свивки слоев каната.

Для спиральных стальных канатов из круглых проволок

$$E_{yc} = E_p \cos^4 \alpha. \quad (21)$$

Жесткостью НИ и КВИ C называют произведение поперечного сечения профиля (A_c) на модуль упругости E_{yc}

$$C = A_c E_{yc}. \quad (22)$$

Приравняем в выражениях (19) и (22) E_{yc} :

$$T_1 / \varepsilon A = C / A \rightarrow \varepsilon = T_1 / C.$$

В литературе [22] приводится, что формулы (20) и (21) дают весьма приближенные значения модуля упругости и отражают лишь тот факт, что с уменьшением углов свивки модуль упругости каната снижается. Большое число факторов, одновременно влияющих на упругие свойства канатов и находящихся в сложном взаимодействии, не позволяет точно определить величину модуля упругости. К тому же величины модуля упругости канатов существенно отличаются в зависимости от конструкции каната, вида нагрузки (статическая или динамическая), времени эксплуатации, величины напряжений, вида нагружения (увеличение или уменьшение нагрузки) и других факторов. Модули упругости канатов одной конструкции, определенные по одной и той же методике, могут отличаться.

В этой связи воспользоваться данными по изгибной, продольной и крутильной жесткости стальных канатов не представляется возможным.

Для определения безразмерной жесткости крученых НИ и КВИ мы воспользовались данными экспериментов по исследованию EJ , выполненных в 2019 г. на кафедре промышленного рыболовства Калининградского государственного технического университета, с НИ из различного синтетического сырья. Так, на рис. 7 изображены экспериментальные данные по изгибной жесткости $EJ = f(d/L)$, $D = 2$ мм (диаметр штыря), ПА (полиамид), L – длина образца.

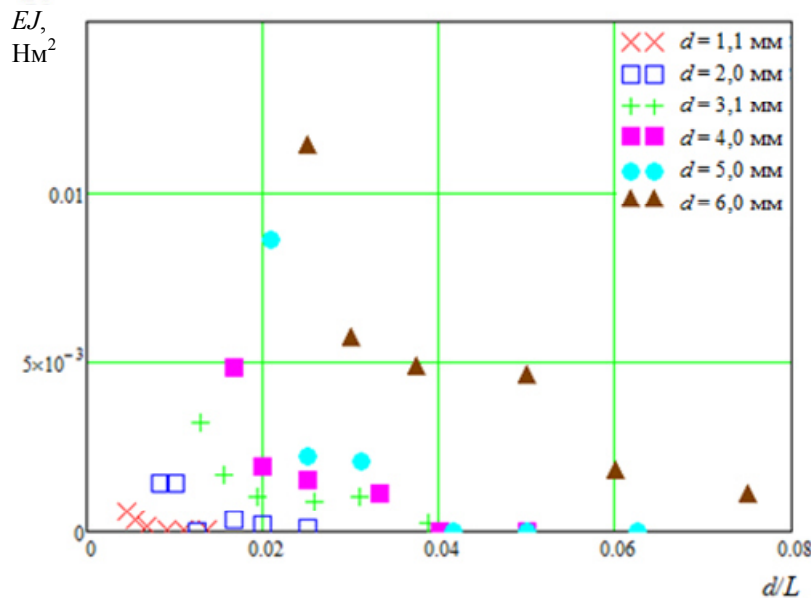


Рис. 7. Экспериментальные данные $EJ = f(d/L)$, $D = 2$ мм, ПА

На основании методики Ю. Ф. Соколова, М. Н. Пахнова и А. И. Вощанкина «Методика оценки жесткости канатов» [19] определим отношение изгибной жесткости к продольной жесткости:

$$\theta = EJ / EA = J / A = d^2 / 16; \quad (23)$$

$$\theta_{\text{экс}} = EJ_{\text{экс}} / EA,$$

где θ – отношение изгибной жесткости к продольной жесткости; $\theta_{\text{экс}}$ – экспериментальные значения отношения изгибной жесткости к продольной; $EJ_{\text{экс}}$ – экспериментальные значения EJ .

На основании (14) и (23) получаем значение θ :

$$\theta = \frac{d^2}{16} \left(\frac{1}{1 + \varepsilon} \right). \quad (24)$$

На основании (24) возможно оценить жесткость НИ и КВИ.

Угол кручения φ НИ и КВИ при нагрузке T обеспечивается раскручиванием изделий. Его величина определяется по формуле

$$\varphi = \frac{M_k L}{GJ_p},$$

где M_k – крутящий момент.

Модуль упругости при сдвиге G определяется выражением

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)},$$

тогда крутильная жесткость GJ_p равна

$$GJ_p = \frac{EJ_p}{2(1+\mu)},$$

а безразмерная комбинация отношения изгибной жесткости к крутильной жесткости

$$\nu = \frac{EJ}{GJ_p} = 2 \frac{J}{J_p} (1+\mu) = 1 + \mu,$$

или, с учетом (15),

$$\nu = \frac{EJ}{GJ_p} = 2 \frac{J}{J_p} (1+\mu) = 1 + \left(1 - \sqrt{\frac{1}{1+\varepsilon}}\right) \frac{1}{\varepsilon}.$$

Отобразим изменение величин $\theta/\text{мм}^2$ и ν или зависимости $\theta = f(d, \varepsilon)$ и $\nu = f(\varepsilon)$ (рис. 8).

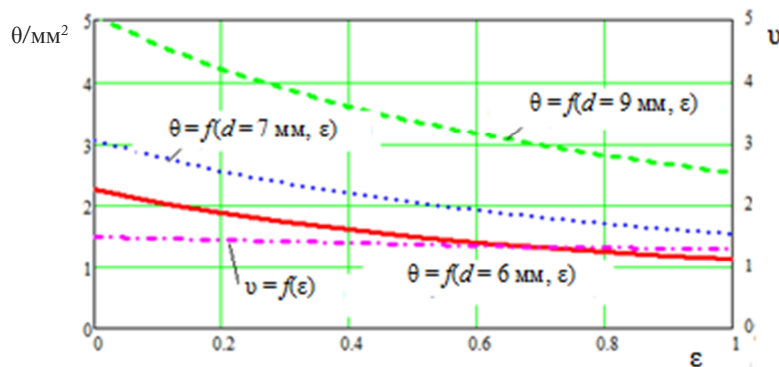


Рис. 8. Зависимости видов $\theta = f(d, \varepsilon)$ и $\nu = f(\varepsilon)$

Из графиков зависимости вида $\theta = f(d, \varepsilon)$ и $\nu = f(\varepsilon)$ (рис. 8) видно, что при увеличении диаметра НИ и КВИ отношение изгибной жесткости к продольной жесткости также увеличивается.

Заключение

В результате изучения литературных источников был получен материал, анализ которого помог осветить проблему физического моделирования ФМС крученых нитевидных изделий и подробно рассмотреть продольную, крученую и изгибную жесткость на примере крученых нитевидных материалов, изготовленных из ПА.

Результаты проведенного исследования относительной жесткости крученых рыболовных изделий могут быть использованы для прогнозирования поведения НИ и КВИ и выбора оптимальных условий их эксплуатации. Вместе с тем следует отметить, что несмотря на полноту исследования с развитием химической промышленности структура НИ и КВИ постоянно изменяется и требует дополнительного изучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов Ф. И. Теория и расчет орудий рыболовства. М.: Пищепромиздат, 1948. 436 с.
2. Фридман А. Л. Теория и проектирование орудий промышленного рыболовства. М.: Лег. и пищ. пром-сть, 1981. 327 с.
3. Розентейн М. М., Недоступ А. А. Механика орудий рыболовства. М.: Моркнига, 2011. 528 с.
4. Биргер И. А., Мавлютов Р. Р. Сопроотивление материалов: учеб. пособие. М.: Наука, 1986. 560 с.
5. Меркин Д. Р. Введение в механику гибкой нити. М.: Наука, 1980. 240 с.
6. Безухов Н. И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести. М.: Высш. шк., 1981. 512 с.
7. Lee Woo Chun, Jihoon Lee, Moo-Youl Choe. Low-Carbon Fishing Gear Design Using Numerical Methods // First International Symposium on Fishing Vessel Energy Efficiency E-Fishing (Vigo, Spain, May 2010). URL: <https://www.researchgate.net/publication/268805144> (дата обращения: 09.08.2019).
8. Nedostup A. A., Razhev A. O. A discrete model of gill nets for static and dynamic problems // Contributions on the theory of fishing gears and related marine systems DEMAT-2013: Proseeding of the 11th International workshop (Germany, Rostock, 9–12 October, 2013). Germany, Rostock, 2013. V. 8. P. 13–22.
9. Герман Б. И. Влияние жесткости сетного полотна на форму рыболовной сети в потоке // Сб. тр. каф. промышл. рыболовства. Калининград: Изд-во КТИ, 1977. Вып. 62. С. 116–120.
10. Стрекалова В. Н. Жесткость системы при задеве трала // Сб. тр. каф. промышл. рыболовства. Калининград: Изд-во КТИ, 1969. Вып. XXI. С. 163–168.
11. Чаюн И. М., Непомнящий А. В., Чаюн М. И. Связь изгибной жесткости подъемного кабель-каната с его деформированно-напряженным состоянием // Hebezeugeund Fördermittel. 2016. N. 2 (50). P. 42–55.
12. Романова Н. М., Устинов Ю. А. Построение новой теории изгиба канатов // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2009. № 2. С. 25–28.
13. Кошкин А. П., Трифанов Г. Д. Канаты для подъемных установок: учеб. пособие. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. 107 с.
14. Недоступ А. А., Насенков П. В., Ражев А. О., Аникин А. А., Коновалова К. В., Никифорова М. В. Постановка задачи исследований физико-механических свойств нитевидно-веревочных рыболовных материалов // Научно-практические вопросы регулирования рыболовства: материалы Национ. науч.-техн. конф. Владивосток: Изд-во ФГБОУ ВО «Дальрыбвтуз», 2019. С. 34–40.
15. Недоступ А. А., Насенков П. В., Ражев А. О., Аникин А. А., Коновалова К. В., Никифорова М. В. К вопросу теоретического исследования характеристик нитевидно-веревочных рыболовных материалов // Научно-практические вопросы регулирования рыболовства: материалы Национ. науч.-техн. конф. Владивосток: Изд-во ФГБОУ ВО «Дальрыбвтуз», 2019. С. 41–45.
16. Недоступ А. А., Ражев А. О. Применение неявных конечно-разностных схем в задачах моделирования динамики траловых систем // Морские интеллектуальные технологии. 2017. № 4 (38). Т. 2. С. 202–206.
17. Недоступ А. А., Ражев А. О., Коротков В. К. Моделирование композитных сетных конструкций методом точечных масс при динамической постановке задачи // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 4 (42). Т. 4. С. 254–258.
18. Недоступ А. А., Ражев А. О., Коротков В. К. Моделирование напряжений в жестких сетных конструкциях методом конечных элементов // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 4 (42). Т. 4. С. 259–264.
19. Соколов Ю. Ф., Пахнов М. Н., Воцанкин А. И. Методика оценки жесткости канатов // Рыбное хозяйство. 1987. № 2. С. 58–60.
20. Дверник А. В., Забелин А. П. Влияние материала траловой сети на ее гидродинамическое сопротивление // Рыбное хозяйство. 1973. № 1. С. 55–57.
21. Недоступ А. А., Орлов Е. К. Исследование статического коэффициента трения рыболовных канатно-веревочных изделий на барабане механизма фрикционного типа // Трение и износ. 2010. Т. 31. № 4. С. 403–411.
22. Ильский А. Л. Расчет и конструирование бурового оборудования и инструмента. М.: Гостоптехиздат, 2004. 636 с.

Статья поступила в редакцию 13.11.2019

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Недоступ Александр Алексеевич – Россия, 236022, Калининград; Калининградский государственный технический университет; канд. техн. наук, доцент; зав. кафедрой промышленного рыболовства; nedostup@klgtu.ru.

Коновалова Карина Витальевна – Россия, 236022, Калининград; Калининградский государственный технический университет; магистрант кафедры промышленного рыболовства; kova.rina4382@mail.ru.

Насенков Павел Владимирович – Россия, 236022, Калининград; Калининградский государственный технический университет; аспирант кафедры промышленного рыболовства; pavel.nasenkov@klgtu.ru.

Разжев Алексей Олегович – Россия, 236022, Калининград; Калининградский государственный технический университет; соискатель кафедры промышленного рыболовства, младший научный сотрудник; progasrp@live.ru.

Альтшуль Борис Аркадьевич – Россия, 236022, Калининград; Калининградский государственный технический университет; д-р техн. наук, профессор; профессор кафедры высшей математики; boris.altshul@klgtu.ru.

Федоров Сергей Васильевич – Россия, 236022, Калининград; Калининградский государственный технический университет; д-р техн. наук, профессор; зав. кафедрой теории механизмов и машин и деталей машин; fedorov@klgtu.ru.



RELATIVE RIGIDITY OF TWISTED FISHING GEAR

**A. A. Nedostup, K. V. Konovalova, P. V. Nasenkov, A. O. Razhev,
B. A. Altschul, S. V. Fedorov**

*Kaliningrad State Technical University,
Kaliningrad, Russian Federation*

Abstract. The article touches upon the problem of physical modeling of fishing twisted filamentary materials, in particular, the justification of the rules of similarity of relative longitudinal, bending and torsional stiffness of filamentary parts. The formulation of the problem is associated with the difficulties of conducting full-scale experiments for designing new fishing gear, as well as with the lack of systematic experiments on measuring the stiffness of synthetic cordage. In connection with this, it becomes necessary to conduct model experiments related to physical modeling of dynamic processes occurring with the cordage under load. There has been calculated the coefficient of proportionality of bending stiffness that determines the ability of filamentary parts and cordage to resist bending. There have been given the formulas that determine the combination of the ratio of bending stiffness to longitudinal stiffness and the dimensionless combination of the ratio of bending stiffness to torsional stiffness. The study allows to predict the behavior and basic properties (diameter, density, strength, elongation, etc.) of modern synthetic filamentous fishing gear at the stage of their creation (design).

Key words: commercial fishery, synthetic filamentary products, physical and mechanical properties, load, bending stiffness, longitudinal stiffness, torsional stiffness, rope, mass, linear density, diameter, length.

For citation: Nedostup A. A., Konovalova K. V., Nasenkov P. V., Razhev A. O., Altschul B. A., Fedorov S. V. Relative rigidity of twisted fishing gear. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing Industry.* 2020;1:46-60. (In Russ.) DOI: 10.24143/2073-5529-2020-1-46-60.

REFERENCES

1. Baranov F. I. *Teoriia i raschet orudii rybolovstva* [Theory and calculation of fishing gear]. Moscow, Pishchepromizdat, 1948. 436 p.
2. Fridman A. L. *Teoriia i proektirovanie orudii promyshlennogo rybolovstva* [Theory and design of industrial fishing gear]. Moscow, Legkaia i pishchevaia promyshlennost' Publ., 1981. 327 p.
3. Rozenshtein M. M., Nedostup A. A. *Mekhanika orudii rybolovstva* [Mechanics of fishing gear]. Moscow, Morkniga Publ., 2011. 528 p.
4. Birger I. A., Mavliutov R. R. *Soprotivlenie materialov: uchebnoe posobie* [Strength of materials: tutorial]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 560 p.

5. Merkin D. R. *Vvedenie v mekhaniku gibkoi niti* [Inserting flexible thread to mechanisms]. Moscow, Nauka Publ., 1980. 240 p.
6. Bezukhov N. I. *Osnovy teorii uprugosti, plastichnosti i polzuchesti* [Fundamentals of theory of elasticity, ductility and creep]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1981. 512 p.
7. Lee Woo Chun, Jihoon Lee, Moo-Youl Choe. Low-Carbon Fishing Gear Design Using Numerical Methods. *First International Symposium on Fishing Vessel Energy Efficiency E-Fishing (Vigo, Spain, May 2010)*. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/268805144> (accessed: 09.08.2019).
8. Nedostup A. A., Razhev A. O. A discrete model of gill nets for static and dynamic problems. *Contributions on the theory of fishing gears and related marine systems DEMAT-2013: Proceedings of the 11th International workshop (Germany, Rostock, 9–12 October, 2013)*. Germany, Rostock, 2013. Vol. 8. Pp. 13-22.
9. German B. I. Vliianie zhestkosti setnogo polotna na formu rybolovnoi seti v potoke [Influence of rigidity of net fabric on fishing net shape in the stream]. *Sbornik trudov kafedry promyshlennogo rybolovstva*. Kaliningrad, Izd-vo KTI, 1977. Iss. 62. Pp. 116-120.
10. Strekalova V. N. Zhestkost' sistemy pri zadeve trala [Rigidity of trawling system when trawl is brushed against]. *Sbornik trudov kafedry promyshlennogo rybolovstva*. Kaliningrad, Izd-vo KTI, 1969. Iss. XXI. Pp. 163-168.
11. Chaun I. M., Nepomniashchii A. V., Chaun M. I. Sviaz' izgibnoi zhestkosti pod"emnogo kabel'-kanata s ego deformirovanno-napriazhennym sostoianiem [Connection of bending stiffness of lifting cable rope with its deformed-stressed state]. *Hebezeuge und Fördermittel*, 2016, no. 2 (50), pp. 42-55.
12. Romanova N. M., Ustinov Iu. A. Postroenie novoi teorii izgiba kanatov [Developing new theory of rope bending]. *Izvestiia vuzov. Severo-Kavkazskii region. Estestvennye nauki*, 2009, no. 2, pp. 25-28.
13. Koshkin A. P., Trifanov G. D. *Kanaty dlia pod"emnykh ustanovok: uchebnoe posobie* [Ropes for hoisting units: tutorial]. Perm', Izd-vo Perm. nats. issled. politekhn. un-ta, 2014. 107 p.
14. Nedostup A. A., Nasenkov P. V., Razhev A. O., Anikin A. A., Konovalova K. V., Nikiforova M. V. Postanovka zadachi issledovaniia fiziko-mekhanicheskikh svoystv nitevidno-verevochnykh rybolovnykh materialov [Setting task of investigating physical and mechanical properties of filamentary fishing gear]. *Nauchno-prakticheskie voprosy regulirovaniia rybolovstva: materialy Natsional'noi nauchno-tekhnikheskoi konferentsii*. Vladivostok, Izd-vo FGBOU VO «Dal'rybvuz», 2019. Pp. 34-40.
15. Nedostup A. A., Nasenkov P. V., Razhev A. O., Anikin A. A., Konovalova K. V., Nikiforova M. V. K voprosu teoreticheskogo issledovaniia kharakteristik nitevidno-verevochnykh rybolovnykh materialov [On issue of theoretical study of characteristics of filamentary fishing gear]. *Nauchno-prakticheskie voprosy regulirovaniia rybolovstva: materialy Natsional'noi nauchno-tekhnikheskoi konferentsii*. Vladivostok, Izd-vo FGBOU VO «Dal'rybvuz», 2019. Pp. 41-45.
16. Nedostup A. A., Razhev A. O. Primenenie neiyavnykh konechno-raznostnykh skhem v zadachakh modelirovaniia dinamiki tralovykh sistem [Using implicit finite-difference schemes in problems of modeling trawl system dynamics]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, 2017, no. 4 (38), vol. 2, pp. 202-206.
17. Nedostup A. A., Razhev A. O., Korotkov V. K. Modelirovanie kompozitnykh setnykh konstruksii metodom tochechnykh mass pri dinamicheskoi postanovke zadachi [Modeling composite fishing nets by method of point masses in dynamic formulation of problem]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, 2018, no. 4 (42), vol. 4, pp. 254-258.
18. Nedostup A. A., Razhev A. O., Korotkov V. K. Modelirovanie napriazhenii v zhestkikh setnykh konstruksiiakh metodom konechnykh elementov [Stress modeling in rigid net constructions using finite element method]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, 2018, no. 4 (42), vol. 4, pp. 259-264.
19. Sokolov Iu. F., Pakhnov M. N., Voshchankin A. I. Metodika otsenki zhestkosti kanatov [Rope stiffness assessment methods]. *Rybnoe khoziaistvo*, 1987, no. 2, pp. 58-60.
20. Dvernik A. V., Zabelin A. P. Vliianie materiala tralovoi seti na ee gidrodinamicheskoe soprotivlenie [Influence of trawl net fabric on its hydrodynamic resistance]. *Rybnoe khoziaistvo*, 1973, no. 1, pp. 55-57.
21. Nedostup A. A., Orlov E. K. Issledovanie staticheskogo koeffitsienta treniia rybolovnykh kanatno-verevochnykh izdelii na barabane mekhanizma friktsionnogo tipa [Studying static coefficient of friction of fishing cordage using drum of friction mechanism]. *Trenie i iznos*, 2010, vol. 31, no. 4, pp. 403-411.
22. Il'skii A. L. *Raschet i konstruirovaniie burovogo oborudovaniia i instrumenta* [Calculation and design of drilling equipment and tools]. Moscow, Gostoptekhizdat, 2004. 636 p.

The article submitted to the editors 13.11.2019

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nedostup Alexander Alekseevich – Russia, 236022, Kaliningrad; Kaliningrad State Technical University; Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Head of the Department of Commercial Fishery; nedostup@klgtu.ru.

Konovalova Karina Vitalievna – Russia, 236022, Kaliningrad; Kaliningrad State Technical University; Masters Course Student of the Department of Commercial Fishery; kova.rina4382@mail.ru.

Nasenkov Pavel Vladimirovich – Russia, 236022, Kaliningrad; Kaliningrad State Technical University; Postgraduate Student of the Department of Commercial Fishery; pavel.nasenkov@klgtu.ru.

Razhev Alexey Olegovich – Russia, 236022, Kaliningrad; Kaliningrad State Technical University; Competitor of the Department of Commercial Fisheries; Junior Researcher; progacpp@live.ru.

Altschul Boris Arkadievich – Russia, 236022, Kaliningrad; Kaliningrad State Technical University; Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Higher Mathematics; boris.altshul@klgtu.ru.

Fedorov Sergey Vasilievich – Russia, 236022, Kaliningrad; Kaliningrad State Technical University; Doctor of Technical Sciences, Professor; Head of the Department of Mechanisms and Machines and Machine Parts; fedorov@klgtu.ru.

