



Рыболовство

Экспериментальные исследования характеристик кручёных рыболовных материалов

А.А. Недоступ, П.В. Насенков

Калининградский государственный технический университет (ФГБОУ ВО «КГТУ»), Советский пр-т, д.1, г. Калининград, 236022

E-mail: nedostup@kltu.ru

SPIN-код: А.А. Недоступ 7035–5279, П.В. Насенков 7434–6253

Целью работы является разработка математических зависимостей физико-механических характеристик кручёных рыболовных материалов. Создание математического аппарата по моделированию геометрических и силовых параметров кручёных рыболовных материалов является приоритетной задачей для разработки новых материалов для промышленного рыболовства и аквакультуры. **Используемые методы:** математический анализ полученных опытных данных относительного удлинения и разрывной нагрузки рыболовных материалов с целью определения зависимостей силовых от конструктивных и геометрических характеристик кручёных рыболовных материалов. **Новизна:** по результатам экспериментальных исследований впервые были получены аппроксимирующие зависимости относительного удлинения и относительной разрывной нагрузки от сплошности изделия, а также от отношения поверхностного и продольного натяжений кручёных рыболовных материалов, изготовленных из полиамида, полипропилена и полиэфира. **Результат:** математические зависимости позволяют рассчитать относительное удлинение и разрывную нагрузку кручёных рыболовных ниток и верёвок, изготовленных из полиамида, полипропилена и полиэфира в пределе точности 90%. **Практическая значимость:** математическое моделирование физико-механических характеристик кручёных рыболовных материалов позволяет при проектировании орудий промышленного рыболовства задавать, с учётом запаса прочности, проектные характеристики рыболовных изделий, которые изготовлены из полиамида, полипропилена и полиэфира.

Ключевые слова: математическое моделирование, физико-механические характеристики, кручёные материалы, относительное удлинение, разрывная нагрузка.

Experimental studies of the characteristics of twisted fishing materials

Alexander A. Nedostup, Pavel V. Nosenkov

Kaliningrad State Technical University («KSTU»), 1, Sovetsky Prospekt, Kaliningrad, 236022, Russia

The purpose of the work is to develop mathematical dependencies of the physical and mechanical characteristics of twisted fishing materials. The creation of a mathematical apparatus for modeling the geometric and force parameters of twisted fishing materials is a priority task for the development of new materials for industrial fishing and aquaculture. **Methods used:** Mathematical analysis of the obtained experimental data on the relative elongation and breaking load of fishing materials in order to determine the dependence of the forces on the structural and geometric characteristics of twisted fishing materials. **Novelty:** Based on the results of experimental studies, approximating dependences of relative elongation and relative breaking load on the continuity of the product, as well as on the ratio of surface and longitudinal tension of twisted fishing materials made of polyamide, polypropylene and polyester, were obtained for the first time. **Result:** Mathematical dependencies make it possible to calculate the relative elongation and breaking load of twisted fishing threads and ropes made of polyamide, polypropylene and polyester within an accuracy of 90%. **Practical significance:** Mathematical modeling of the physical and mechanical characteristics of twisted fishing materials allows, when designing industrial fishing tools, to set, taking into account the safety margin, the design characteristics of fishing products that are made of polyamide, polypropylene and polyester.

Keywords: mathematical modeling, physical and mechanical characteristics, polyamide, polypropylene, polyester, relative elongation, relative breaking load, continuity.

ВВЕДЕНИЕ

Сетные орудия промышленного рыболовства представляют собой сложные инженерные конструкции, состоящие из множества элементов. Каждый элемент, это нитка, верёвка, шнур могут быть кручёные, плетёные, изготовленные из различных материалов,

таких как полиамид (ПА), полипропилен (ПП), полиэфир (ПЭФ), полиэтилен (ПЭ), также могут быть смешанные между собой. Сетные орудия промышленного рыболовства в процессе эксплуатации испытывают большие нагрузки, которые воздействуют на каждый элемент, а каждый элемент в данном случае подвержен растяжению, удлинению, в аварийных ситуациях,

когда прочность уменьшается, нитки, верёвки, канаты рвутся. Данные изменения в конструкциях ведут к аварийным ситуациям, к потере промыслового времени, потере улова и к неоправданным экономическим затратам, что является проблемой для предприятий рыбохозяйственного комплекса и «Росрыболовства» [Войниканис-Мирский, 1985; Розенштейн, 2000; Перепелкин, 2008]. Для прогнозирования таких физико-механических свойств как относительное удлинение и разрывная нагрузка рыболовных кручёных материалов необходим математический аппарат¹. В нашем случае это математические модели, которые описывают относительное удлинение рыболовных кручёных материалов и разрывную нагрузку. Они необходимы для того, чтобы избежать аварийных ситуаций, предсказать какой требуется диаметр и материал для того или иного орудия промышленного рыболовства, для тех или иных условий эксплуатации, причём, за-

пас прочности того или иного элемента можно будет задавать с учётом этих математических зависимостей. Таким образом, данные математические зависимости можно использовать не только для прогнозирования физико-механических свойств рыболовных кручёных материалов, но и использовать для моделирования орудий промышленного рыболовства в процессе их эксплуатации [Недоступ и др., 2020 а, б, в].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для разработки математических моделей необходимо обработать экспериментальные данные, которые получены опытным путём [Насенков и др., 2020]. Эксперименты проводились с образцами нитевидных рыболовных ниток и верёвок, изготовленных из полиамида (ПА), полипропилена (ПП) и полиэфира (ПЭФ) диаметрами 1,1 мм, 2,0 мм, 3,1 мм и 4,0 мм. В табл. 1 представлены входные параметры, получен-

Таблица 1. Экспериментальные данные

Table 1. Experimental data

Диаметр нити, d , мм	Площадь сечения нити, $S = \pi d^2 / 4$ 10^{-6} м ²	Кол-во волокон, n	Диаметр волокна, d_0 , мм	Сплошность нити, $F_0 = \frac{n \frac{\pi d_0^2}{4}}{\frac{\pi d^2}{4}}$	Длина нити, L , мм	Скорость разрыва нити, v , см/мин	Разрывная прочность нити, P , Н	Относительное удлинение нити, ε
ПП 187 Текс (в сухом виде)								
1,1	0,95	737	0,102	0,102	100	10	300,8	0,64
					100	50	309,6	0,65
					100	100	315,6	0,64
					175	10	302,2	0,46
					175	50	304,9	0,45
					175	100	312,5	0,46
					250	10	294,5	0,38
					250	50	305,4	0,39
					250	100	307,6	0,38
					100	10	684,5	0,86
					100	50	716,2	0,79
					100	100	730,3	0,76
2,0	3,14	2214	0,013	0,093	175	10	696,8	0,61
					175	50	708,7	0,59
					175	100	724,3	0,58
					250	10	678,6	0,51
					250	50	694,8	0,49
					250	100	717,2	0,48

¹ <https://digitechlab.ru/cad-fg.html>

Диаметр нити, d , мм	Площадь сечения нити, $S = \pi d^2 / 4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$	Кол-во волокон, n	Диаметр волокна, d_0 , мм	Сплошность нити, $F_0 = \frac{\pi d_0^2}{4} \cdot n$	Длина нити, L , мм	Скорость разрыва нити, v , см/мин	Разрывная прочность нити, P , Н	Относительное удлинение нити, ε
3,1	7,54	3715	0,065		100	10	1339	0,82
					100	50	1410,2	0,80
					100	100	1447,1	0,77
					175	10	1348,3	0,61
					175	50	1411,6	0,57
					175	100	1425,5	0,53
					250	10	1313,4	0,51
					250	50	1373,6	0,48
					250	100	1414,5	0,45
					4,0	12,57	7812	0,082
100	50	2406,7	0,94					
100	100	2507,7	0,94					
175	10	2386,4	0,68					
175	50	2457,9	0,66					
175	100	2379,7	0,61					
250	10	2384,1	0,55					
250	50	2387,3	0,52					
250	100	2380,7	0,51					

ные экспериментальным путём. Более подробно данные представлены в научной статье [Насенков и др., 2020].

Экспериментальные исследования на определение разрывной нагрузки и относительного удлинения проводились на универсальной разрывной машине Shimadzu Autograph AGS-X10 настольного типа с программным обеспечением. Данная разрывная машина имеет возможность проведения стандартных испытаний по контролю качества, механических испытаний как для общего назначения, так и для проведения научно-исследовательских работ. Испытания проводились по стандартным методикам определения прочностных характеристик, но с различными длинами образцов и различными скоростями разрыва.

Оценка точности проводимых испытаний соответствует точности измерения усилия разрывной машины при высокоточном типе в пределах $\pm 0,5\%$ от значения силы номинальной мощности нагрузки (согласно паспортным данным разрывной машины Shimadzu Autograph AGS-X10). Калибровка усилия проводилась перед каждым испытанием в автоматическом режиме.

Диаметр волокна определялся при помощи автоматизированной системы измерения толщины волокна МТ-580. Система предназначена для автоматизации определения геометрических размеров волокна под микроскопом.

В табл. 2 представлен ряд расчётных данных испытываемых образцов в сухом виде при номинальной влажности ПП – 1,0%, ПА – 5,0%, ПЭФ – 1,0% [РД 31.03.03–90, 1990]².

На основании данных табл. 2 построены графики аппроксимирующих зависимостей $\varepsilon = f(\alpha)$ (рис. 1) и $\varepsilon = f(\lambda)$ (рис. 2) для всех материалов. Аппроксимация была проведена методом наименьших квадратов.

Ошибка аппроксимирующих зависимостей составляет не более 7%.

Относительное удлинение можно представить расчётным значением (1) и (2):

$$\varepsilon = k_{\lambda} \left(\frac{L}{d} \right)^{-1/2} = k_{\lambda} \lambda^{-1/2}, \quad (1)$$

² РД 31.03.03–90, 1990. Применение синтетических канатов на судах министерства морского флота. С. 55.

Таблица 2. Расчётные данные
Table 2. Calculated data

d , мм	L , мм	Масса нити, m , 10^{-3} кг	Вес нити, $p=mg$, 10^{-3} Н	$\lambda=L/d$	$\sigma=P/S$ 10^8 Н/м ² (Па)	$\alpha=p/P$ 10^{-6}	$E=\sigma/\epsilon$ 10^8 Н/м ² (Па)	$\nu=\epsilon/\lambda$ 10^{-3}	$\chi=\sigma/\lambda$ 10^6 Н/м ² (Па)	$H=P(\nu^2/\epsilon L)$ Вт/с
ПП 187 Текс (в сухом виде)										
1,1	100	0,05	0,49	90,9	3,16	1,6	4,92	7,07	3,48	0,01
	100				3,25	1,5	4,94	7,24	3,58	0,32
	100				3,32	1,5	5,13	7,11	3,65	1,35
	175	0,09	0,88	159,1	3,18	2,9	6,82	2,92	1,99	0,01
	175				3,20	2,8	7,11	2,83	2,01	0,26
	175				3,28	2,8	7,16	2,88	2,06	1,08
	250	0,12	1,17	227,3	3,09	3,9	8,15	1,67	1,36	0,008
	250				3,21	3,8	8,24	1,71	1,41	0,21
	250				3,23	3,8	8,38	1,69	1,42	0,88
2,0	100	0,17	1,66	50	2,17	2,4	2,51	17	4,35	0,02
	100				2,28	2,3	2,88	16	4,55	0,62
	100				2,32	2,2	3,03	15	4,64	2,64
	175	0,29	2,84	87,5	2,21	4,0	3,63	6,98	2,53	0,01
	175				2,25	4,0	3,83	6,72	2,57	0,47
	175				2,30	3,9	3,97	6,62	2,63	1,98
	250	0,40	3,92	125	2,16	5,7	4,21	4,10	1,72	0,01
	250				2,21	5,6	4,53	3,90	1,76	0,39
	250				2,28	5,4	4,78	3,81	1,82	1,67
3,1	100	0,32	3,13	32,2	1,77	2,3	2,15	25,54	5,50	0,04
	100				1,86	2,2	2,33	24,86	5,79	1,22
	100				1,91	2,1	2,48	23,9	5,94	5,21
	175	0,55	5,39	56,4	1,78	3,9	2,93	10,79	3,16	0,03
	175				1,87	3,8	3,28	10,08	3,31	0,98
	175				1,88	3,7	3,57	9,37	3,34	4,27
	250	0,78	7,64	80,6	1,74	5,8	3,43	6,27	2,15	0,02
	250				1,82	5,5	3,78	5,96	2,25	0,79
	250				1,87	5,4	4,15	5,59	2,32	3,48
4,0	100	0,66	6,47	25	1,88	2,7	1,93	38,88	7,53	0,06
	100				1,91	2,6	2,03	37,64	7,66	1,77
	100				1,99	2,5	2,12	37,64	7,98	7,40
	175	1,10	10,78	43,7	1,89	4,5	2,76	15,68	4,34	0,05
	175				1,95	4,3	2,96	15,09	4,47	1,47
	175				1,89	4,5	3,09	13,99	4,32	6,17
	250	1,55	15,19	62,5	1,89	6,3	3,46	8,76	3,03	0,05
	250				1,90	6,3	3,63	8,35	3,04	1,27
	250				1,89	6,3	3,70	8,17	3,03	5,17

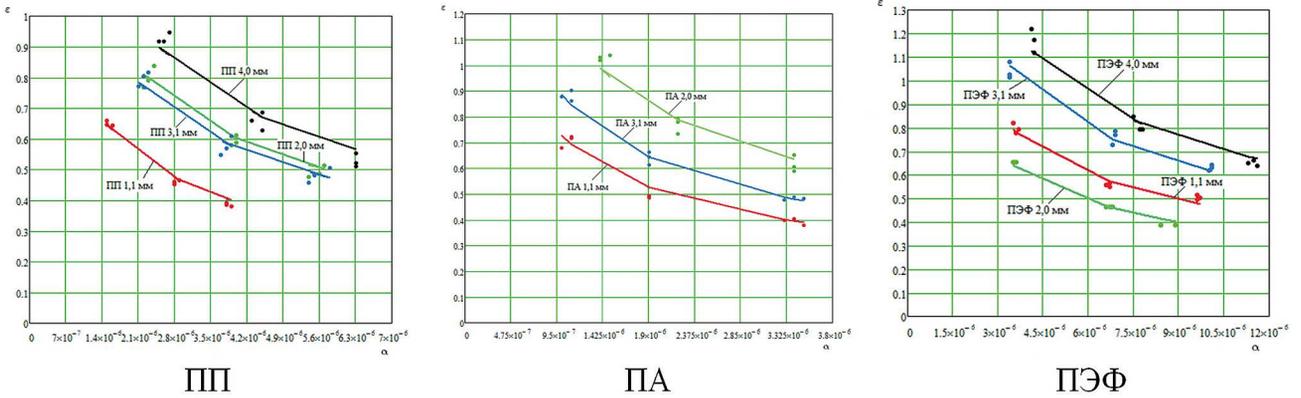


Рис. 1. График аппроксимирующей зависимости относительного удлинения от отношения веса нити к разрывной прочности
Fig. 1. Graph of approximating dependence of relative elongation on the ratio of thread weight to tensile strength

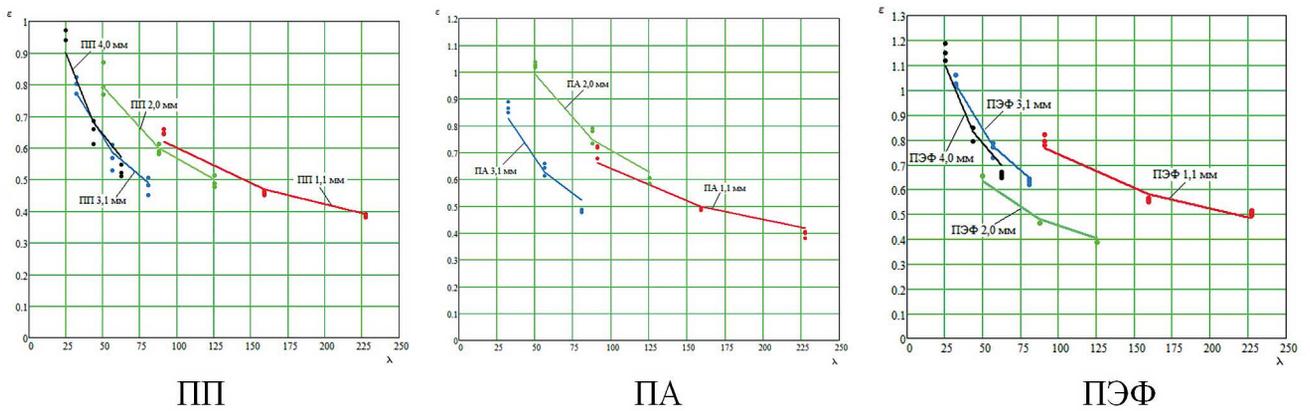


Рис. 2. График аппроксимирующей зависимости относительного удлинения от конструктивного удлинения
Fig. 2. Graph of approximating dependence of relative elongation on structural elongation

где ε – относительное удлинение; k_λ – коэффициент, зависящий от вида материала, диаметра и сплошности; λ – конструктивное удлинение.

$$\varepsilon = k_\alpha \left(\frac{p}{P} \right)^{-1/2} = k_\alpha \alpha^{-1/2}, \quad (2)$$

где k_α – коэффициент, зависящий от вида материала, диаметра и сплошности; α – отношение веса нити к разрывной прочности.

Приравняем (1) и (2)

$$k_\lambda \lambda^{-1/2} = k_\alpha \alpha^{-1/2} \quad (3)$$

или

$$\frac{k_\lambda}{k_\alpha} = \left(\frac{\alpha}{\lambda} \right)^{-1/2} = \left(\frac{pd}{PL} \right)^{-1/2}. \quad (4)$$

Умножим в скобках верхнюю и нижнюю части выражения на отношение $\pi d/4$, получим:

$$\frac{pd \left(\frac{\pi d}{4} \right)}{PL \left(\frac{\pi d}{4} \right)} = \frac{pS}{PL \left(\frac{\pi d}{4} \right)},$$

при условии, что напряжение $\sigma = P/S$, длина окружности нитки $l_{окр} = \pi d$ и площадь поверхности нитки $S_{нов} = Ll_{окр}$, получим:

$$\frac{pS}{PL \left(\frac{\pi d}{4} \right)} = \frac{4p}{\sigma L \pi d} = \frac{4p}{\sigma S_{нов}} = \frac{4\sigma_{нов}}{\sigma},$$

где $\sigma_{нов} = p/S_{нов}$ – напряжение поверхности нити.

Тогда выражение (4) представим в виде:

$$\frac{k_\lambda}{k_\alpha} = \left(\frac{4\sigma_{нов}}{\sigma} \right)^{-1/2} = 0,5 \sqrt{\frac{\sigma}{\sigma_{нов}}}. \quad (5)$$

Представим коэффициенты k_λ и k_α , зависящими от сплошности нитки F_0 :

$$\begin{cases} \frac{k_\lambda}{k_\alpha} = aF_0; \\ \frac{k_\lambda}{k_\alpha} = 0,5 \sqrt{\frac{\sigma}{\sigma_{нов}}} \end{cases} \quad (6)$$

$$p = bL. \quad (14)$$

где b – коэффициент, зависящий от материала нитки (вес одного метра нитки) или характеристика материала волокна нитки.

Тогда выражение (13) представим в виде:

$$P = a^2 F_0^2 bL \frac{d}{L} = a^2 F_0^2 b d \quad (15)$$

или в виде:

$$P = \left(\frac{k_\lambda}{k_\alpha} \right)^2 b d. \quad (16)$$

где a – коэффициент, зависящий от материала нитки.

Приравняем отношения k_λ/k_α

$$aF_0 = 0,5 \sqrt{\frac{\sigma}{\sigma_{нов}}}$$

или

$$a^2 F_0^2 = 0,25 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{нов}} \right). \quad (7)$$

Из (7) получим:

$$\sigma = 4 a^2 F_0^2 \sigma_{нов}. \quad (8)$$

Введём коэффициент α_1 :

$$\alpha_1 = 4 a^2, \quad (9)$$

тогда выражение (8) представим в виде:

$$\sigma = \alpha_1 F_0^2 \sigma_{нов}. \quad (10)$$

Так как $\sigma = P/S$, то выражение (10) представим в виде:

$$P = \alpha_1 F_0^2 S \sigma_{нов} = \alpha_1 F_0^2 S \frac{p}{S_{нов}} = \alpha_1 F_0^2 p \frac{S}{S_{нов}}. \quad (11)$$

При условии, что отношение площадей:

$$\frac{S}{S_{нов}} = \frac{\frac{\pi d^2}{4}}{\pi dL} = \frac{1}{4\lambda}, \quad (12)$$

получим выражение (11) в виде:

$$P = \alpha_1 F_0^2 p \frac{1}{4\lambda} = a^2 F_0^2 p \lambda^{-1}. \quad (13)$$

Обозначим величину p через выражение:

Сравнение разрывной нагрузки, полученной экспериментальным путём, и разрывной нагрузки, полученной по математической модели, представлено в табл. 3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенные математические зависимости (1–16) позволяют рассчитать относительное удлинение и разрывную нагрузку кручёных рыболовных ниток и верёвок, изготовленных из ПА, ПП и ПЭФ, в пределе точности 90%.

Математическое моделирование физико-механических характеристик кручёных рыболовных материалов позволит при проектировании орудий промышленного рыболовства задавать, с учётом запаса прочности, проектные характеристики рыболовных изделий, которые изготовлены из ПА, ПП и ПЭФ. Дальнейшие исследования будут направлены на определение математических зависимостей расчёта относительного удлинения и разрывной нагрузки для влажных кручёных рыболовных материалов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Соблюдение этических норм

Все применимые этические нормы соблюдены.

Таблица 3. Сравнительные данные

Table 3. Comparative data

Диаметр нити, d , мм	Длина нити, L , мм	Скорость разрыва нити, v , см/мин	Экспериментальная разрывная прочность нити, $P_{экс.}$, Н	Расчётная разрывная прочность нити, $P_{рас.}$, Н
ПП 187 Текс (в сухом виде)				
1,1	100	10	300,8	303,5
2,0	100	10	684,5	691,7
3,1	100	10	1339	1361
4,0	100	10	2367,1	2488

Финансирование

Исследование выполнено в рамках выполнения государственного задания по теме «Разработка физических, математических и предсказательных моделей процессов эксплуатации донного и разноглубинного траловых комплексов».

ЛИТЕРАТУРА

- Войниканис-Мирский В.Н. 1985. Рыболовные материалы, сетные и такелажные работы. М.: Агропромиздат. 183 с.
- Насенков П.В., Недоступ А.А., Наумов В.А. 2020. Экспериментальные исследования разрывного усилия и относительного удлинения рыболовных верёвочной-нитевидных изделий с различной скоростью разрыва и длиной исследуемых образцов // Известия КГТУ. № 58. С. 35–48.
- Недоступ А.А., Насенков П.В., Ражев А.О., Коновалова К.В., Федоров С.В. 2020 а. Обоснование правил подобия разрывной нагрузки рыболовных кручёных изделий // Вестник АГТУ. Серия: Рыбное хозяйство. № 1. С. 38–45.
- Недоступ А.А., Коновалова К.В., Насенков П.В., Ражев А.О., Альтшуль Б.А., Федоров С.В. 2020 б. Относительная жёсткость рыболовных кручёных изделий // Вестник АГТУ. Серия: Рыбное хозяйство. № 1. С. 46–60.
- Недоступ А.А., Ражев А.О., Наумов В.А., Дятченко С.В., Коновалова К.В., Соколова Е.В. 2020 в. Расчёт прогиба композитного ваера численным методом точечных масс при компьютерном моделировании // Морские интеллектуальные технологии. № 2. Т. 1. С. 210–215.
- Перепелкин К.Е. 2008. Химические волокна: развитие производства, методы получения, свойства, перспективы. Санкт-Петербург: РИО СПГУТД. 315 с.
- Розенштейн М.М. 2000. Механика орудий рыболовств. Калининград: Изд-во КГТУ. 362 с.

REFERENCES

- Voynikanis-Mirsky V.N. 1985. Fishing materials, netting and rigging. Moscow: Agropromizdat. 183 p. (In Russ.)
- Nasenkov P.V., Nedostup A.A., Naumov V.A. 2020 a. Experimental studies of breaking force and relative elongation of fishing rope-thread products with different breaking speeds and lengths of the studied samples // News of KSTU. No. 58. P. 35–48. (In Russ.)
- Nedostup A.A., Nasenkov P.V., Razhev A.O., Konovalova K.V., Fedorov S.V. 2020 б. Justification of the rules for similarity of breaking load of fishing twisted products // Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Fisheries. Astrakhan. ASTU. No. 1. P. 38–45. (In Russ.)
- Nedostup A.A., Konovalova K.V., Nasenkov P.V., Razhev A.O., Altshul B.A., Fedorov S.V. 2020 в. Relative rigidity of fishing twisted products // Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Fisheries. Astrakhan. ASTU. No. 1. P. 46–60. (In Russ.)
- Nedostup A.A., Razhev A.O., Naumov V.A., Dyatchenko S.V., Konovalova K.V., Sokolova E.V. 2020. Calculation of the deflection of a composite warp using the numerical method of point masses in computer modeling // Marine intelligent technologies. No. 2. T. 1. P. 210–215. (In Russ.)
- Perpelkin K.E. 2008. Chemical fibers: production development, production methods, properties, prospects. St. Petersburg: RIO SPGUTD. 315 pp. (In Russ.)
- Rosenshtein M.M. 2000. Mechanics of fishing gear. Kaliningrad: Publishing house KSTU. 362 p. (In Russ.)

Поступила в редакцию 07.07.2024 г.

Принята после рецензии 01.10.2024 г.