

Научная статья
УДК 639.2.081.1; 621.9.014.2; 621.9.014
<https://doi.org/10.24143/2073-5529-2022-4-82-89>
EDN FTZUQM

Производительность сил траловой системы – VI: математическое моделирование (часть III)

А. А. Недоступ[✉], А. О. Ражев,
П. В. Насенков, К. В. Коновалова, А. А. Быков

Калининградский государственный технический университет,
Калининград, Россия, nedostup@klgtu.ru[✉]

Аннотация. Производительность внешних продольных и поперечных сил, создаваемых при буксировке траловых систем, а именно сил натяжения и сжатия канатов, веревок и ниток канатно-сетного орудия промышленного рыболовства, связана с продольным и поперечным модулем упругости канатно-веревочного изделия. Рассмотрены физико-механические свойства синтетических капроновых ниток, веревок и капроновых шнуров, из которых изготовлены большинство траловых систем. Предложен расчет физико-механических свойств синтетических канатно-веревочных изделий и шнуров на основании заданных параметров при возможной статической и динамической нагрузке. Предложены алгоритмы расчета физико-механических свойств ниток, веревок и капроновых шнуров при условии постоянства объема и массы. Метод расчета физико-механических свойств капроновых ниток и веревок при условии неопределенности дает ошибку в расчете относительного удлинения δ_e не более 4,3 %, но при этом максимальная ошибка δ_μ в расчете коэффициента Пуассона μ достигает 85,5 %. Это доказывает, что формула для расчета коэффициента Пуассона μ для анизотропных тел не позволяет оценить данный коэффициент при малых нагрузках и постоянном объеме.

Ключевые слова: траловая система, производительность силы, канатно-веревочное изделие, плетеный шнур, расчет, нагрузка, продольная и поперечная сила, модуль упругости

Благодарности: исследование проведено в рамках выполнения государственного задания по теме «Разработка физических, математических и предсказательных моделей процессов эксплуатации донного и разноглубинного траловых комплексов».

Для цитирования: Недоступ А. А., Ражев А. О., Насенков П. В., Коновалова К. В., Быков А. А. Производительность сил траловой системы – VI: математическое моделирование (часть III) // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2022. № 4. С. 82–89. <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2022-4-82-89>. EDN FTZUQM.

Original article

Force performance of trawl system – VI: mathematical modeling (part III)

А. А. Nedostup[✉], А. О. Razhev,
P. V. Nassenkov, K. V. Konovalova, A. A. Bykov

Kaliningrad State Technical University,
Kaliningrad, Russia, nedostup@klgtu.ru[✉]

Abstract. Performance of external longitudinal and transverse forces developed in the course of towing the trawl systems, namely, the tension and compression forces of cables, ropes and yarns of the rope-net gears in commercial fishing of the longitudinal modulus of elasticity and the transverse modulus of elasticity in the cordage products. Physical and mechanical properties of the synthetic nylon threads, ropes and nylon cords, from which most trawl systems are made, are considered. Analysis of the physical and mechanical properties of synthetic rope products and cords based on the specified parameters for possible static and dynamic loads is proposed. Algorithms for calculating the physical and mechanical properties of threads, ropes and nylon cords are proposed under the condition of constant volume and mass. Method of calculating physical and mechanical properties of the nylon threads and ropes under the condition of uncertainty gives an error not exceeding 0.4% in calculating the relative elongation δ_e , but the maximum

error δ_{ii} in calculating Poisson's ratio μ reaches 7.12%. This proves that the formula for calculating the Poisson's ratio μ for anisotropic bodies does not allow estimating this ratio at low loads and constant volume.

Keywords: trawl system, force performance, cordage article, sennit cord, calculation, load, longitudinal and transverse forces, module of elasticity

Acknowledgment: the study was carried out as part of the state assignment on the topic "Development of physical, mathematical and predictive models of the operation processes of bottom and mid-water trawl systems".

For citation: Nedostup A. A., Razhev A. O., Nasenkov P. V., Konovalova K. V., Bykov A. A. Force performance of trawl system – VI: mathematical modeling (part III). *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing Industry. 2022;4:82-89.* (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2022-4-82-89>. EDN FTZUQM.

Введение

Расчет физико-механических свойств синтетических крученых канатно-веревочных изделий (КВИ), а также плетеных шнуров (ПШ) является неотъемлемой частью проектирования траловых комплексов. Обоснование диаметра и разрывной нагрузки КВИ и ПШ необходимо выполнить при создании технико-рабочего проекта трала. Это обусловлено прочностью канатов канатных связей, веревок и ниток делей, из которых создана траловая конструкция.

В существующих методиках обоснования диаметра и разрывной нагрузки КВИ и ПШ траловых

конструкций принимается во внимание гидродинамическое сопротивление, распределенное по поясам канатно-сетной части трала, при этом не учитывается ни шворка, ни съячейка, а также форма траловой оболочки в поперечном сечении [1], что сказывается при обосновании прочностных характеристика канатов и дели. Задают повышенный коэффициент прочности n КВИ и ПШ, а это отражается на стоимости траловой конструкции. На рис. 1 изображена канатно-сетная часть разноглубинного трала и поперечные сечения вдоль его оболочки.

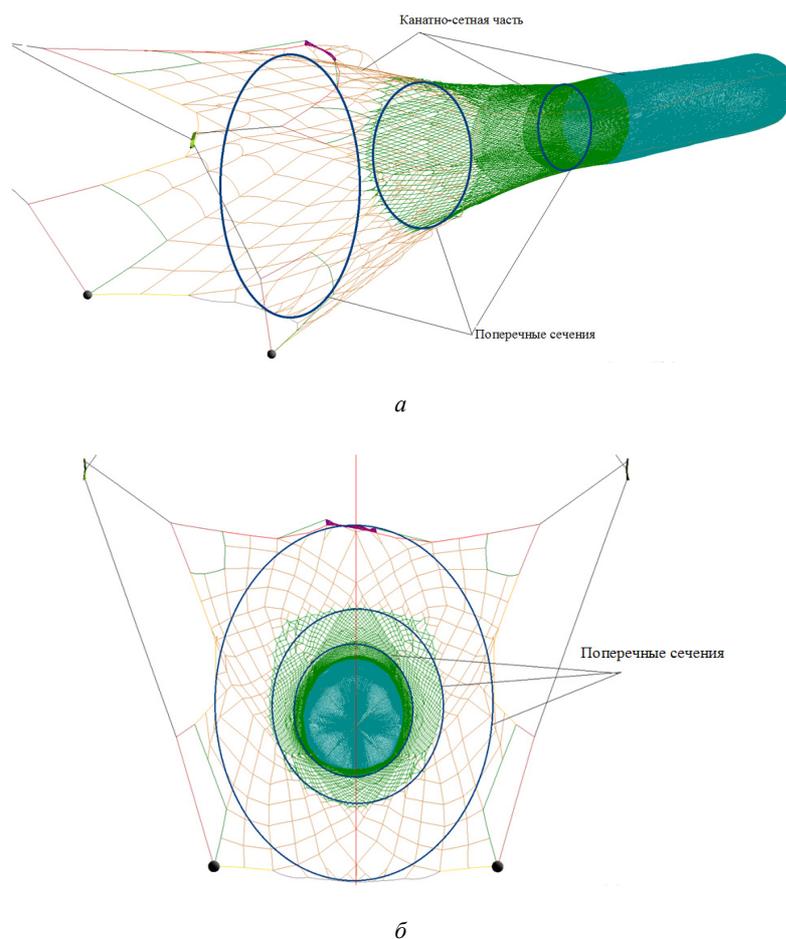


Рис. 1. Канатно-сетная часть разноглубинного трала: *a* – вид в аксонометрии; *б* – вид поперечной плоскости

Fig. 1. Rope-net part of a mid-water trawl: *a* – axonometric view; *б* – transverse view

Поперечные сечения, как правило, делают в местах соединения канатных связей и съячевания сетных пластин. Гидродинамическое сопротивление рассчитывается по поясам с помощью алгоритма [2]. При этом расчет ведется в статике с учетом постоянства среднего взвешенного угла атаки траловой оболочки, что является ошибочным, т. к. алгоритм расчета гидродинамического сопротивления канатно-сетной оболочки получен для целого трала, а не его участков, и в этом случае неизвестны длины обра-

зующих поясов и их форма. Неточное определение углов ориентации КВИ и ПШ, а также неучет съячейки и шворки и влияния динамических нагрузок приводят к ошибочным расчетам сил натяжения в КВИ и ПШ, таким образом, коэффициент запаса прочности n снова повышают.

На рис. 2 изображены соединения сетных пластин (отрезков делей) и канатных связей съячейкой и шворкой (шворочный шов).

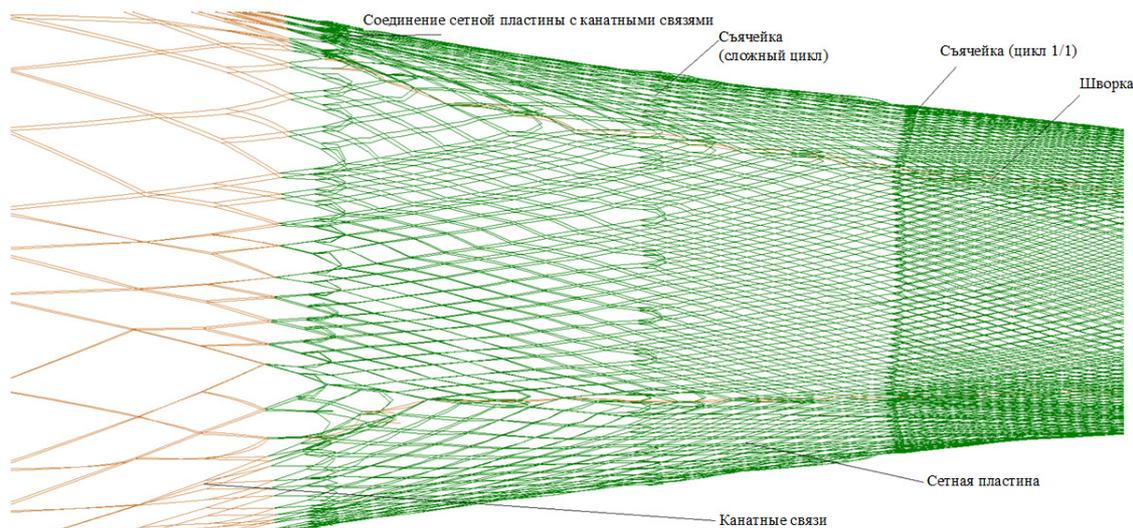


Рис. 2. Соединения канатно-сетной части разноглубинного трала

Fig. 2. Connections of the rope-net part of the mid-water trawl

Как видно, трал (при соответствующих оснастке, длине ваеров, параметрах траловых досок и скорости траления) может менять свою форму от устья до тралового мешка [1], причем нагрузки в КВИ и ПШ напрямую зависят от формы поперечного сечения, соединения сетных пластин, канатных связей, а также углов ориентации КВИ и ПШ в пространстве. Данными углами также пренебрегают в расчетах и обоснованиях прочностных характеристик траловой конструкции, и осреднение угла атаки меридиана траловой оболочки приводит к большим погрешностям в расчетах.

Таким образом, неравномерно распределять на канатные связи, веревки и шнуры равномерно по поясам гидродинамическое сопротивление канатно-сетной части трала. Это может привести к аварийным ситуациям, таким как порывы сетных пластин, обрыв подборы, канатной связи и т. д.

Обратим внимание на производительность сил траловой системы (далее ТС) [3]. Производительность внешних продольных и поперечных сил, создаваемых при буксировке траловых систем, а именно сил натяжения и сжатия канатов, веревок и ниток канатно-сетного орудия промышленного рыболовства, связана с продольным модулем упругости и поперечным модулем упругости КВИ [4].

Введем допущения:

– КВИ и ПШ рассматриваются как идеально гибкие цилиндрические изделия, которые подвержены продольному растяжению и сжатию и поперечному сжатию;

– при исследовании КВИ и ПШ не учитывались такие конструктивные параметры, как свивка, количество прядей, толщина проволоки и волокна, тип плетения;

– при исследовании КВИ и ПШ не учитываются внутренние силы трения между волокнами и прядями КВИ;

– объем КВИ и ПШ при нагрузке не изменяется ($V = \text{const}$).

Постановка задачи

Рассмотрим задачу расчета физико-механических свойств капронового изделия (каната, веревки или нитки) физико-механических свойств ПШ дели тралового мешка на основании заданных параметров при возможной статической и динамической нагрузке.

Так как КВИ и ПШ имеют в сечении условную окружность, то примем, что ось OZ совпадает с осью OY и OX при вращении КВИ и ПШ [2]. Запишем

уравнения, характеризующие физико-механические свойства для идеально гибких КВИ и ПШ, связывающие конструктивные, геометрические и силовые их характеристики при условии постоянства их объема $V = \text{const}$:

$$\left. \begin{aligned} ke &= \alpha \\ e &= \alpha^2 \\ \chi &= \mu\alpha \\ ek^2 &= 1 \\ \alpha k &= 1 \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где k – коэффициент пропорциональности, $k = f(\varepsilon, \lambda)$, ε – относительная продольная деформация, λ – конструктивное удлинение (конструктивный параметр); e – отношение модулей упругости; α – безразмерное сужение, $\alpha = f(\varepsilon, \lambda)$, т. е. $\alpha = 1/k$; χ – безразмерная компенсационная сила; μ – коэффициент Пуассона.

Запишем основные выражения для КВИ и ПШ, входящие в (1):

$$e = N_y / N_x = E_y / E_x, \quad (2)$$

где N_y – производительность условных поперечных сил; N_x – производительность условных продольных сил; E_y – поперечный модуль упругости; E_x – продольный модуль упругости:

$$\lambda = L/d, \quad (3)$$

где L – длина КВИ и ПШ; d – диаметр КВИ и ПШ;

$$\chi = T_y^d / T_x^l, \quad (4)$$

где T_y^d – компенсационная сила (противодействия T_y) в поперечном направлении (вдоль оси OY); T_x^l – компенсационная сила (противодействия T_x) в продольном направлении (вдоль оси OX);

$$T_x^l = \varepsilon T_x; \quad (5)$$

$$T_y^d = \varepsilon_d T_y, \quad (6)$$

где T_x – приложенная сила растяжения (вдоль оси OX); T_y – сила сжатия (вдоль оси OY); ε_d – относительная поперечная деформация;

$$\alpha = T_y / T_x. \quad (7)$$

Рассмотрим систему (1), добавив выражение, связывающее конструктивное удлинение, коэффициент Пуассона и α КВИ и ПШ. Таким образом, систему (1) можно переписать в виде

$$\left. \begin{aligned} ke &= \alpha \\ e &= \alpha^2 \\ \mu &= \alpha\lambda \\ \chi &= \mu\alpha \\ ek^2 &= 1 \\ \alpha k &= 1 \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

при условии коэффициент Пуассона μ

$$\mu = \left(1 - \sqrt{\frac{1}{1+\varepsilon}} \right) \frac{1}{\varepsilon}. \quad (9)$$

Отметим, что коэффициент Пуассона μ для анизотропных тел зависит от изменения объема КВИ и ПШ, в таком случае примем, что коэффициент Пуассона μ зависит от параметров

$$\mu = f(\varepsilon, \nu, \theta, \xi, \zeta), \quad (10)$$

где ν – безразмерный объем; θ – безразмерная плотность; ξ – композитность (неоднородность); ζ – крутка (плетение).

Безразмерный объем ν и безразмерная плотность θ связаны выражением (масса КВИ и ПШ $m = \text{const}$)

$$\nu = 1 / \theta. \quad (11)$$

Пренебрегая композитностью (неоднородный или смешанный) ξ и круткой (плетением) ζ , получим

$$\mu = f(\varepsilon, \nu),$$

или через относительное сужение КВИ и ПШ

$$\varepsilon_d = \Delta d / d \leq 1, 0, \quad (12)$$

где Δd – изменение диаметра (уменьшение).

Для анизотропного материала (КВИ и ПШ) коэффициент Пуассона

$$\mu = \varepsilon_d / \varepsilon, \quad (13)$$

это доказывает проведенные экспериментальные исследования [5].

Параметр χ

$$\chi = \left(1 - \sqrt{\frac{1}{1+\varepsilon}} \right) \frac{\alpha}{\varepsilon}. \quad (14)$$

На основании вышеприведенных формул (1)–(9) и (14) приведем два алгоритма (условие определенности и условие неопределенности) расчета зависимости физико-механических свойств КВИ и ПШ от действующей нагрузки в продольном сечении, связывающие конструктивные, геометрические и силовые их характеристики при условии $V = \text{const}$ и $m = \text{const}$ (рис. 3 и 4).

В алгоритме на рис. 3 приводится приложенная гипотетическая сила растяжения T_x^p .

Недоступ А. А., Ражев А. О., Насенков П. В., Коновалова К. В., Быков А. А. Производительность сил тросовой системы – VI: математическое моделирование (часть III)

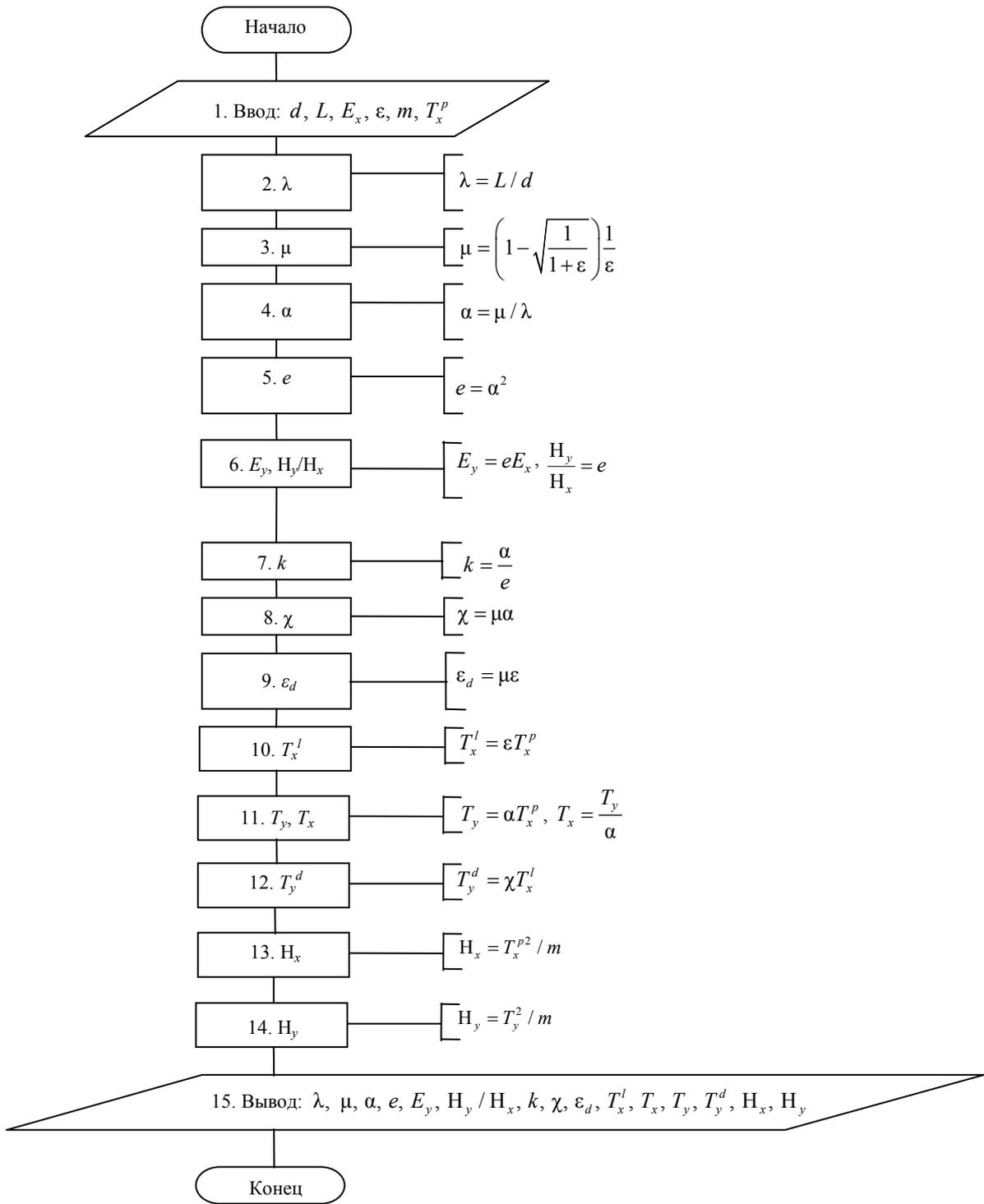


Рис. 3. Алгоритм расчета физико-механических свойств КВИ и ПШ (условие определенности)

Fig. 3. Algorithm for calculating the physical and mechanical properties of cable and rope items and sennit cords (condition of certainty)

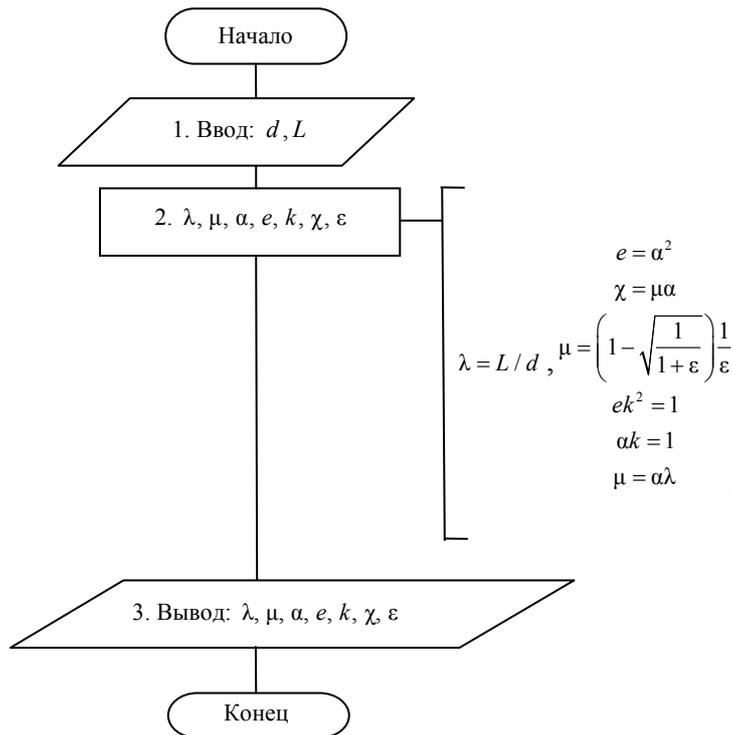


Рис. 4. Алгоритм расчета физико-механических свойств КВИ и ПШ (условие неопределенности)

Fig. 4. Algorithm for calculating the physical and mechanical properties of cable and rope items and sennit cords (condition of uncertainty)

Результаты и обсуждение

Приведем расчет капроновых ниток и веревок на основании заданных экспериментальных харак-

теристик при возможной статической и динамической нагрузке (табл.).

Заданные и расчетные физико-механические свойства капроновых ниток и веревок (условие неопределенности)

Preset and calculated physical and mechanical properties of capron threads and ropes (uncertainty condition)

Заданные характеристики			Экспериментальные характеристики			Расчетные характеристики						Ошибка, %	
d, мм	L, м	T, Н	λ	ε, %	μ	α, · 10 ⁻³	e, · 10 ⁻⁵	k	χ, · 10 ⁻³	ε _p [*] , %	μ _p ^{**}	δ _ε	δ _μ
0,45	0,1	9,80	222,2	7	0,72	2,2	50,0	447	1,1	7	0,5	0,0	30,6
		19,61		11	1,27	2,2	49,8	447	1,1	11	0,5	0,0	60,6
		29,41		13	1,31	2,2	49,6	449	1,1	13	0,5	0,0	61,8
0,56		19,61	178,6	4	3,32	2,7	73,9	368	1,3	4	0,48	0,0	85,5
		36,22		9	2,07	2,6	68,8	381	1,2	9	0,47	0,0	77,3
		58,83		12	1,98	2,6	66,4	388	1,2	11,6	0,47	3,3	76,3
0,85		19,61	117,6	6	2,93	4,0	1,6	246	1,9	6	0,48	0,0	83,6
		58,83		11	1,92	3,9	1,5	254	1,8	11	0,46	0,0	76,0
		117,67		14	1,75	3,8	1,5	259	1,8	14	0,45	0,0	74,3
1,1	39,22	90,9	4	1,97	5,3	2,8	187	2,5	4	0,48	0,0	75,6	
	58,83		5	1,94	5,3	2,8	188	2,5	5	0,48	0,0	75,2	
	117,67		7	1,88	5,2	2,7	191	2,4	7,3	0,48	4,3	74,5	

* ε_p – расчетное значение относительного удлинения; ** μ_p – расчетное значение коэффициента Пуассона.

Воспользуемся алгоритмом, приведенным на рис. 4, используя экспериментальные данные [5].

Исходя из данных таблицы можно сделать следующие выводы:

– метод расчета физико-механических свойств капроновых ниток и веревок при условии неопределенности дает ошибку в расчете относительного удлинения δ_ϵ не более 4,3 %, но при этом максимальная ошибка δ_μ в расчете коэффициента Пуас-

сона μ достигает 85,5 %. Это доказывает, что формула (9) для расчета коэффициента Пуассона μ для анизотропных тел не позволяет оценить данный коэффициент при малых нагрузках T ;

– для оценки и расчета коэффициента Пуассона μ необходимо получить аналитическую зависимость вида (10).

Отобразим графически расчетные данные таблицы, т. е. зависимости $\chi = f(\lambda)$ и $\alpha = f(\lambda)$ (рис. 5).

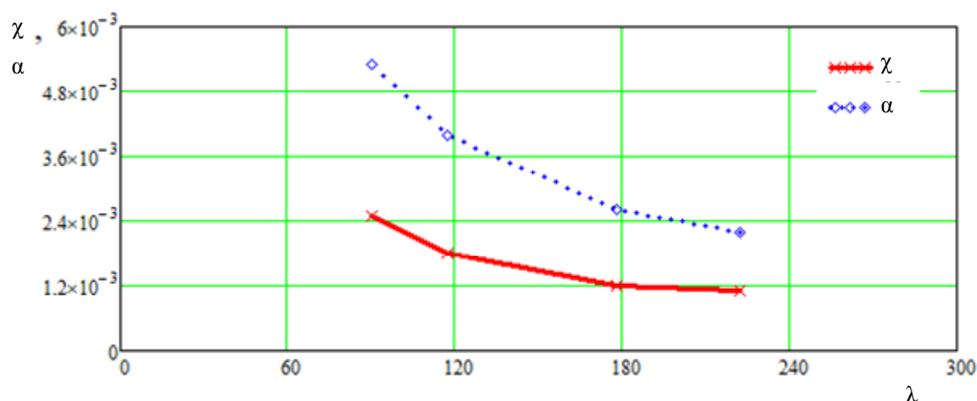


Рис. 5. Зависимости $\chi = f(\lambda)$ и $\alpha = f(\lambda)$

Fig. 5. Dependencies $\chi = f(\lambda)$ and $\alpha = f(\lambda)$

На рис. 5 видно, что с увеличением конструктивного удлинения параметры λ и χ уменьшаются по гиперболической зависимости.

Заключение

В статье приводятся алгоритмы расчета физико-механических свойств КВИ и ПШ при условии определенности (заданы параметры) и неопределенности (не заданы параметры). Рассчитаны физико-механические свойства капроновых ниток и веревок при условии неопределенности на основании заданных параметров при возможной статической и динамической нагрузке.

Производительность внешних продольных и поперечных сил, создаваемых при буксировке трало-

вых систем, а именно сил натяжения и сжатия канатов, веревок и ниток канатно-сетного орудия промышленного рыболовства, связана с продольным модулем упругости и поперечным модулем упругости канатно-веревочного изделия.

На основании вышеприведенных формул (1)–(9), (12)–(14) и алгоритмов расчета зависимости физико-механических свойств КВИ и ПШ от действующей нагрузки в продольном сечении, связывающих конструктивные, геометрические и силовые их характеристики при условии $V = \text{const}$ и $m = \text{const}$, в дальнейшем спрогнозируем физико-механические свойства КВИ и ПШ.

Список источников

1. Недоступ А. А., Ражев А. О. Производительность сил траловой системы: постановка задачи // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Рыбное хозяйство. 2021. № 2. С. 55–65.
2. Недоступ А. А., Ражев А. О., Насенков П. В., Коновалова К. В., Быков А. А., Пивоварова Ю. С. Производительность сил траловой системы – III: математическое моделирование (часть I) // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Рыбное хозяйство. 2021. № 4. С. 63–72.

3. Розенштейн М. М. Проектирование орудий рыболовства. М.: Колос, 2009. 400 с.
4. Габрюк В. И., Кулагин В. Д. Механика орудий рыболовства и АРМ промысловика. М.: Колос, 2000. 416 с.
5. Насенков П. В., Недоступ А. А., Долин Г. М. Экспериментальные исследования коэффициента Пуассона нитевидных рыболовных материалов // Изв. Калинингр. гос. техн. ун-та. 2021. № 62. С. 26–34.

References

1. Proizvoditel'nost' sil tralovoi sistemy: postanovka zadachi [Productivity of trawl system forces:]. Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Rybnoe khoziaistvo, 2021, no. 2, pp. 55-65.

2. Nedostup A. A., Razhev A. O., Nasenkov P. V., Konovalova K. V., Bykov A. A., Pivovarova Iu. S. Proizvoditel'nost' sil tralovoi sistemy – III: matematicheskoe modelirovanie (chast' I) [Force productivity of trawl system – III: mathematical modeling (part I)]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Rybnoe khoziaistvo*, 2021, no. 4, pp. 63-72.

3. Rozenshtein M. M. *Proektirovanie orudii rybolovstva* [Design of fishing tools]. Moscow, Kolos Publ., 2009. 400 p.

4. Gabriuk V. I., Kulagin V. D. *Mekhanika orudii rybolovstva i ARM promyslovika* [Mechanics of fishing gear and AWP of fisherman]. Moscow, Kolos Publ., 2000. 416 p.

5. Nasenkov P. V., Nedostup A. A., Dolin G. M. Eksperimental'nye issledovaniia koeffitsienta Puassona nitevidnykh rybolovnykh materialov [Experimental studies of Poisson's ratio of thread-like fishing gears]. *Izvestiia Kaliningradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2021, no. 62, pp. 26-34.

Статья поступила в редакцию 22.01.2021; одобрена после рецензирования 23.05.2022; принята к публикации 14.11.2022
The article is submitted 22.01.2021; approved after reviewing 23.05.2022; accepted for publication 14.11.2022

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Алексеевич Недоступ – кандидат технических наук, доцент; заведующий кафедрой промышленного рыболовства; Калининградский государственный технический университет; nedostup@klgtu.ru

Алексей Олегович Разжев – кандидат технических наук; ведущий научный сотрудник отдела НИОКР УНИД; Калининградский государственный технический университет; progacpp@live.ru

Павел Владимирович Насенков – заведующий УИЛ САПР техники промышленного рыболовства, младший научный сотрудник; Калининградский государственный технический университет; pavel.nasenkov@klgtu.ru

Карина Витальевна Коновалова – аспирант кафедры промышленного рыболовства; Калининградский государственный технический университет; karina.konovalova@klgtu.ru

Алексей Александрович Быков – аспирант кафедры промышленного рыболовства; Калининградский государственный технический университет; bykov@intechfuture.ru

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

Alexey O. Razhev – Candidate of Sciences in Technology; Leading Researcher of R&D Department of Management of Research Activities; Kaliningrad State Technical University; progacpp@live.ru

Pavel V. Nasenkov – Head of the ERL of CAD Commercial Fishing Equipment, Junior Researcher; Kaliningrad State Technical University; pavel.nasenkov@klgtu.ru

Karina V. Konovalova – Postgraduate Student of the Department of Commercial Fishery; Kaliningrad State Technical University; karina.konovalova@klgtu.ru

Alexey A. Bykov – Postgraduate Student of the Department of Commercial Fishery; Kaliningrad State Technical University; bykov@intechfuture.ru

