

УДК 531.3:639.2

**СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СЛУЧАЙНЫХ ФУНКЦИЙ
ХАРАКТЕРИСТИК КАНАТНО-СЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

И.М. Ахмедов

**STATISTICAL EVALUATION OF RANDOM FUNCTIONS OF
THE PROPERTIES OF THE CABLE-NETTING ELEMENTS**

I.M. Ahmedov

Аннотация. Выполнен статистический анализ результатов экспериментального определения статического разрывного усилия синтетических канатов. Представлено сравнение линейной и степенной зависимости разрывного усилия от диаметра каната. Экспериментальные данные не противоречат гипотезе о степенной зависимости величины статической разрывной нагрузки от диаметра. Линейную зависимость можно использовать только на ограниченном интервале диаметров. Строгий статистический анализ позволяет избежать количественных, а в отдельных случаях и качественных ошибок при оценке характеристик канатно-сетных элементов.

Ключевые слова: случайные функции; синтетические канаты; испытание прочности; разрывное усилие; эмпирические зависимости.

Abstract. Statistical analysis of the experimental determination results of synthetic ropes static breaking strength has been performed. Comparison of linear and power dependence of breaking strength on the diameter are presented. Experimental data are consistent with the hypothesis of the exponential dependence of the magnitude of the breaking load of rope diameter. A linear relationship can be used only on a limited range of diameters. Rigorous statistical analysis allows to avoid the quantitative, and in some cases, and qualitative errors in the evaluation of the properties of the cable-netting elements.

Keywords: random functions; synthetic ropes; strength test; breaking strength; empirical relationships.

Введение

Проблема определения характеристик разрыва нитей и канатов традиционно привлекает внимание исследователей. Так в [1-6] проведен анализ результатов испытаний статической прочности канатов, изготовленных разными производителями. Причем, если в [1-4] зависимость статического разрывного усилия от диаметра каната $P = f(d)$ получилась нелинейной, то в [5, 6] – линейной. Задача данной статьи, опираясь на выводы работы [7], провести статистическую оценку характеристик канатно-сетных элементов, полученных разными авторами.

Зависимость статического разрывного усилия от диаметра каната

В [2] Была выдвинута гипотеза, что зависимость $f(d)$ является степенной:

$$P = f(d) = A_p \cdot d^{\alpha_p}, \quad (1)$$

где P – статическое разрывное усилие, кН; d – диаметр каната, мм; A_p , α_p – эмпирические коэффициенты.

Методом наименьших квадратов для канатов были найдены значения эмпирических коэффициентов в формуле (1) для 3-х прядных канатов производства ООО «Севзапканат» [8] из полипропилена, полистила, «Силвер» (полистил+полиэстер) и полиамида. Значения коэффициентов представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Эмпирические коэффициенты в формуле (1)

№	Материал	A_p	α_p
1	полипропилен	1,865	0,21
2	полистил	1,860	0,25
3	полистил+полиэстер	1,911	0,22
4	полиамид	1,902	0,27

На рис. 1 показано сравнение результатов расчета по формуле (1) с экспериментальными данными. Среднее квадратическое отклонение опытных данных от зависимости (1), рассчитанное по формуле (2) из [9], не превышает 1,2 %

$$\varepsilon := 100 \cdot \sqrt{\frac{1}{n-2} \cdot \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{P_i}{f(d_i)}\right)^2} \quad (2)$$

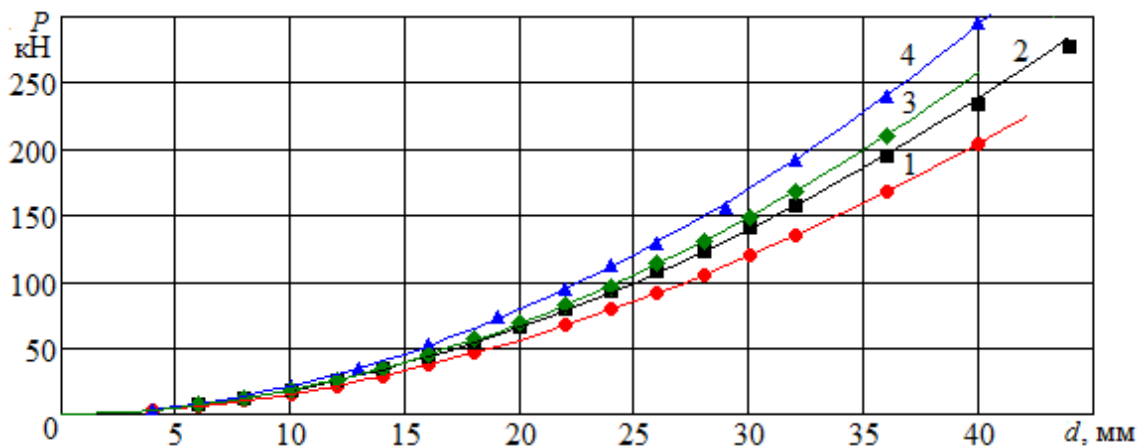


Рисунок 1 – Зависимость статического разрывного усилия 3-х прядных канатов от диаметра для различных материалов из табл. 1.

Точки – опытные данные [8]; линии – расчет по формуле (1)

Наименьшее разрывное усилие получилось у канатов, изготовленных ООО «Севзапканат» из полипропилена, наибольшее – из полиамида. Показатели степени α_p для всех материалов оказались несколько меньше двух. Последнее говорит о том, что разрывное напряжение в материале канатов будет уменьшаться с увеличением их диаметра. Для дальнейшего изложения важно, что зависимость (1) остается справедливой и при стремлении диаметра к нулю, так как величина P тоже будет стремиться к нулю.

В [6] полученные опытные данные аппроксимируются линейной зависимостью:

$$P = \varphi(d) = 0,825 \times d - 0,585. \quad (3)$$

Рис. 2 показывает, что прямая 1, построенная по (3), может описывать искомую зависимость только на ограниченном интервале диаметров. Условие $\varphi(0) = 0$ не выполняется.

Границы доверительных интервалов для математического ожидания срезов случайной функции $\varphi(d)$ найдем по формулам [9] с доверительной вероятностью $\gamma = 0,98$:

$$\varphi_1(d) := \varphi(d) - t\gamma \cdot \sigma_\varphi \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(d - \bar{d})^2}{S}}, \quad \varphi_2(d) := \varphi(d) + t\gamma \cdot \sigma_\varphi \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(d - \bar{d})^2}{S}}, \quad (4)$$

$$\sigma_{\varphi} = \sqrt{\frac{1}{n-2} \cdot \sum_{i=1}^n (P_i - \varphi(d_i))^2} = 0,0285 \text{ кН}, \quad \bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i = 1,6 \text{ мм},$$
$$S = \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2 = 0,8 \text{ мм}^2.$$

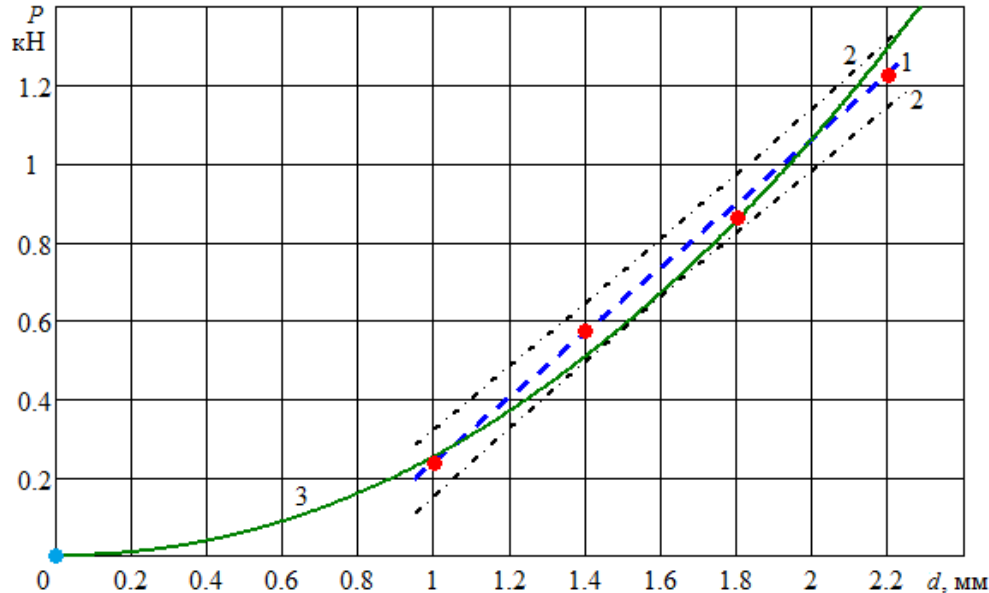


Рисунок 2 – Зависимость статического разрывного усилия канатов от диаметра. Точки – опытные данные [5, 6]; 1 – результат расчет по формуле (3), 2 – границы доверительных интервалов, 3 – по формуле (1)

Доверительный интервал (обозначен штрихпунктирными линиями на рис. 2) получился довольно широким, что связано с малым числом экспериментальных точек $n = 4$.

Выдвинем гипотезу, что экспериментальные точки принадлежат нелинейной степенной зависимости (3). При этом необходимо учесть, что начало координат является достоверной точкой случайной функции. Эмпирические коэффициенты, найденные методом наименьших квадратов: $A_p = 0,254$; $\alpha_p = 2,067$. Полученные значения близки к величинам, приведенным в табл. 1, но в отличие от них превышают 2. Возможно, это связано с тем, что экспериментальные исследования [5, 6] были проведены только с канатами сравнительно небольших диаметров.

Линия 3 на рис. 2, рассчитанная по формуле (1) с найденными эмпирическими коэффициентами не выходит за границы доверительного интервала линейной зависимости (3). Следовательно, экспериментальные данные не противоречат выдвинутой гипотезе о степенной зависимости величины статической разрывной нагрузки от диаметра каната.

Коэффициент гидродинамического сопротивления плоской сети

Другое важное направление статистического анализа – зависимость коэффициента гидродинамического сопротивления плоской сети от числа Рейнольдса. В учебнике А.Л. Фридмана [10] в результате графического представления результатов многочисленных испытаний различных сетей в координатах $Re_{\lambda} - C_x$ (рис. 3) и аппроксимации данных опытов была получена эмпирическая зависимость для коэффициента гидродинамического сопротивления плоской сети при поперечном обтекании (сплошная прямая на рис. 3):

$$C_x = 3(Re_{\lambda})^{0,07}, \quad Re_{\lambda} = \lambda V/\nu, \quad (5)$$

где V – скорость движения, λ – гидравлический размер ячеи, ν – коэффициент кинематической вязкости воды, Re_λ – число Рейнольдса.

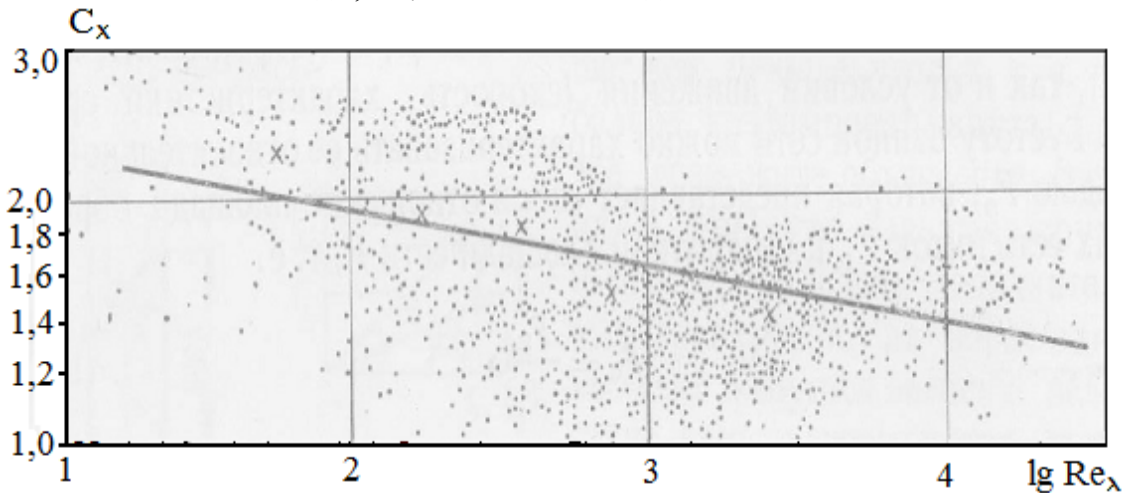


Рисунок 3 – Коэффициент гидродинамического сопротивления плоской сети при поперечном обтекании [10]. Сплошная линия – осреднение по всему массиву данных, формула (5)

По указанным данным в [11, 12] методом наименьших квадратов была получена эмпирическая зависимость, существенно отличающаяся от (5):

$$C_x = 10,3(Re_\lambda)^{0,25}. \quad (6)$$

В [7] было показано, что причина такого большого различия коэффициентов (5) и (6) в том, что в [10] процедура осреднения была проведена по всей совокупности результатов испытания сетей, полученных при разных диапазонах аргумента Re_λ (как на рис. 3), тогда как ее нужно проводить по *реализациям случайной функции*.

Аналогичная ситуация складывается при статистическом анализе и других случайных функций, характеризующих канатно-сетные элементы: зависимости коэффициента гидродинамического сопротивления плоской сети от числа Рейнольдса при продольном обтекании [13], зависимости удлинения канатов и нитей от силы натяжения [14, 15].

Заключение

Проанализированные экспериментальные данные не противоречат гипотезе о степенной зависимости величины статической разрывной нагрузки от диаметра каната. Линейную зависимость можно использовать только на ограниченном интервале диаметров. При стремлении диаметра к нулю величина статической разрывной нагрузки также стремится к нулю. Осреднение результатов экспериментального исследования одной случайной функции характеристик канатно-сетных элементов по всему массиву данных разных авторов может привести не только к количественным, но и к качественным ошибкам.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Евсева С.С. Сравнительный анализ технических характеристик синтетических канатов // Вестник АГТУ. Промышленное рыболовство. 2008. № 3. С. 90-92.
2. Наумов В.А., Ахмедова Н.Р., Ахмедов И.М. Анализ результатов испытания прочности трехрядных канатов из полимерных материалов // Известия КГТУ. 2015. № 36. С. 43-51.

3. Ахмедов И.М., Наумов В.А. Зависимость разрывного усилия синтетических канатов от их диаметра // Водопользование и задачи гидромеханики: сборник научных трудов. Калининград: Изд-во ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2015. С. 15-20.
4. Великанов Н.Л., Наумов В.А., Примак Л.В., Ахмедов И.М. Испытания прочности канатов из полимерных материалов // Механизация строительства, 2017. Т. 78, № 4. С. 30-35.
5. Насенков П.В., Суконов А.В. К вопросу определения прочности канатов большого диаметра // Вестник молодежной науки. 2016. № 5. С. 15.
6. Насенков П.В., Суконов А.В. Экспериментальное определение прочности нитевидных рыболовных изделий по составляющим // Вестник молодежной науки. 2017. № 2. С. 19.
7. Бояринова Н.А., Кикот А.В., Наумов В.А. Особенности статистической обработки результатов экспериментальных исследований случайной функции, полученных разными авторами // Известия КГТУ. 2015. № 37. С. 199-206.
8. Текстильные канаты, Севзапканат. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.sevzapkanat.com/index.php?newsid=409> (дата обращения 12.12.2017).
9. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. Москва: Физматлит, 2006. 816 с.
10. Фридман А.Л. Теория и проектирование орудий промышленного рыболовства. Москва: Легкая и пищевая промышленность, 1981. 238 с.
11. Великанов Н.Л., Наумов В.А., Кикот А.В., Бояринова Н.А. Методика определения гидродинамического сопротивления плоских элементов рыболовных сетей при поперечном обтекании // Рыбное хозяйство. 2010. № 4. С. 72-75.
12. Наумов В.А., Бояринова Н.А. Анализ опытных данных, полученных при поперечном обтекании плоских сетей в переходной области сопротивления // Известия КГТУ. 2011. № 20. С. 195-202.
13. Наумов В.А., Агиевич Н.А. Эмпирическая формула для коэффициента гидродинамического сопротивления плоской рыболовной сети при продольном обтекании в автомодельной области // Известия КГТУ. 2014. № 32. С. 238-244.
14. Наумов В.А., Ахмедов И.М. Расчет формы и усилий в канатах с учетом их эластичности // Известия КГТУ. 2016. № 40. С. 159-166.
15. Ахмедов И.М., Наумов В.А. Вероятностный подход к оценке силы натяжения эластичного каната при поперечном обтекании турбулентным потоком // Актуальные проблемы природообустройства региона: сборник научных трудов. Калининград: Изд-во ФГБОУ ВО «КГТУ», 2017. С. 119-126.

REFERENCES

1. Evseeva S.S. *Sravnitel'nyy analiz tekhnicheskikh kharakteristik sinteticheskikh kanatov* [Comparative performance analysis of synthetic ropes]. *Vestnik AGTU. Promyshlennoe rybolovstvo*. 2008. No 3, pp. 90-92.
2. Naumov V.A., Akhmedova N.R., Akhmedov I.M. *Analiz rezul'tatov ispytaniya prochnosti trekhpryadnykh kanatov iz polimernykh materialov* [Analysis of the polymeric materials of 3-strand strength ropes testing]. *Izvestiya KGTU*. 2015. No 36, pp. 43-51.
3. Akhmedov I.M., Naumov V.A. *Zavisimost' razryvnogo usiliya sinteticheskikh kanatov ot ikh diametra* [Dependence of the breaking strength of synthetic ropes on their diameter]. *Vodopol'zovanie i zadachi gidromekhaniki: Sbornik nauchnykh trudov*. Kaliningrad: KGTU Publ. 2015, pp. 15-20.
4. Velikanov N.L., Naumov V.A., Primak L.V., Akhmedov I.M. *Ispytaniya prochnosti kanatov iz polimernykh materialov* [Testing the strength of ropes made of polymer materials]. *Mekhanizatsiya stroitel'stva*. 2017. V. 78, No 4, pp. 30-35.



5. Nasenkov P.V., Sukonov A.V. *K voprosu opredeleniya prochnosti kanatov bol'shogo diametra* [To the question of determining the strength of ropes of large diameter]. *Vestnik molodezhnoy nauki*. 2016. No 5, p. 15.
6. Nasenkov P.V., Sukonov A.V. *Ekspierimental'noe opredelenie prochnosti nitevidnykh rybolovnykh izdeliy po sostavlyayushchim* [Experimental determination of strength of filamentary fishing products by components]. *Vestnik molodezhnoy nauki*. 2017. No 2, p. 19.
7. Boyarinova N.A., Kikot A.V., Naumov V.A. *Osobennosti statisticheskoy obrabotki rezul'tatov eksperimental'nykh issledovaniy sluchaynoy funktsii, poluchennykh raznymi avtorami* [Features of statistical processing of experimental results on random functions obtained by different authors]. *Izvestiya KGTU*. 2015. No 37, pp. 199-206.
8. *Tekstil'nye kanaty* [Textile ropes]. *Sevzapkanat* [Electronic resource]. Available at: <http://www.sevzapkanat.com/index.php?newsid=409> (accessed 12.12.2017).
9. Kobzar' A.I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov* [Applied mathematical statistics. For engineers and researchers]. Moscow: Fizmatlit Publ., 2006. 816 p.
10. Fridman A.L. *Teoriya i proektirovanie orudiy promyshlennogo rybolovstva* [Theory and design of guns commercial fishery] Moscow: Light and food industry Publ., 1981. 238 p.
11. Velikanov N.L., Naumov V.A., Kikot A.V., Boyarinova N.A. *Metodika opredeleniya gidrodinamicheskogo soprotivleniya ploskikh elementov rybolovnykh setey pri poperechnom obtekanii* [The method of determining hydrodynamic resistance of flat elements of fishing nets at a cross flow]. *Rybnoe khozyaystvo*. 2010. No 4, pp. 72-75.
12. Naumov V.A., Boyarinova N.A. *Analiz opytnykh dannykh, poluchennykh pri poperechnom obtekanii ploskikh setey v perekhodnoy oblasti soprotivleniya* [Analysis of experimental data obtained in a cross flow flat netting in the transition region resistance]. *Izvestiya KGTU*. 2011. No 20, pp. 195-202.
13. Naumov V.A., Agievich N.A. *Empiricheskaya formula dlya koeffitsienta gidrodinamicheskogo soprotivleniya ploskoy rybolovnoy seti pri prodol'nom obtekanii v avtomodel'noy oblasti* [The empirical formula for hydrodynamic drag coefficient of flat fishing nets with longitudinal flow in self-similar region]. *Izvestiya KGTU*. 2014. No 32, pp. 238-244.
14. Naumov V.A., Akhmedov I.M. *Raschet formy i usiliy v kanatakh s uchetom ikh elastichnosti* [Analysis of shape and effort in the ropes with regard to their elasticity]. *Izvestiya KGTU*. 2016. No 40, pp. 159-166.
15. Akhmedov I.M., Naumov V.A. *Veroyatnostnyy podkhod k otsenke sily natyazheniya elastichnogo kanata pri poperechnom obtekanii turbulentnym potokom* [Probabilistic approach to the estimation of the tension of the elastic rope at a cross flow turbulent flow]. *Aktual'nye problemy prirodoobustroystva regiona: Sbornik nauchnykh trudov*. Kaliningrad: KGTU Publ., 2017, pp. 119-126.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Ахмедов Исфендияр Махмуд-оглы

Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, аспирант кафедры водных ресурсов и водопользования

E-mail: isfendi@mail.ru

Ahmedov Isfendiar Mahmud-oglu

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, The post-graduate student of The Water Resources Department

E-mail: isfendi@mail.ru

Корреспондентский почтовый адрес и телефон для контактов с автором статьи:



236022, Россия, Калининград, Советский пр., 1, КГТУ, ГУК, каб. 322. Ахмедов И.М.
8(4012)99-53-37