

Научная статья

УДК 639.2.081

DOI 10/46845/1997-3071-2022-66-30-39

**Методика планирования эксперимента по исследованию статического
коэффициента трения жгута дели на тяговом барабане механизма
фрикционного типа**

Алексей Николаевич Мартынов¹, Александр Алексеевич Недоступ²

^{1,2}Калининградский государственный технический университет, Калининград,
Россия

¹ ajiex94@gmail.com

² nedostup@klgtu.ru

Аннотация. Статический коэффициент трения является основной характеристикой взаимодействия орудия рыболовства (ОР) с фрикционной машиной. Изменения могут приводить к скольжению ОР по поверхности барабана(-ов) машины, что влечет за собой негативные последствия, такие как изнашивание ОР, увеличение времени выборки, повышение энергозатрат и т. д. Существуют точные методы определения статического коэффициента трения только для канатопереводных изделий (КВИ). В статье представлены описание и планирование эксперимента по вычислению данного коэффициента в отношении дели. Чтобы соответствовать методикам для КВИ, опыты выполняются в лабораторных условиях. С целью проведения исследований были подготовлены образцы делей из трех различных материалов – полиамида (ПА), полипропилена (ПП), полиэфира (ПЭ) – одинакового диаметра (2 мм), которые будут взаимодействовать с тремя стальными барабанами различных диаметров (104, 128 и 152 мм). Также учитываются разные углы дуги контакта (90, 135 и 180 град). Чтобы реализовать данный эксперимент, силами кафедры промышленного рыболовства сконструирована специальная установка на основе тензостанции МС-200 и электродвигателя, который имитирует привод барабана неводовыборочного механизма. При помощи тензодатчика будет фиксироваться величина максимального натяжения набегающей ветви дели (S_1) и построены графические зависимости S_1 от времени проведения эксперимента (t). Используя полученные данные, вычислим коэффициент трения двумя различными способами – классическим и по формуле Недоступа и Орлова. Далее будет происходить сравнение вычисленных результатов и сделаны соответствующие выводы.

Ключевые слова: статический коэффициент трения, дель, проскальзывание, трение, механизм фрикционного типа, эксперименты, натяжение, планирование, набегающая ветвь

Для цитирования: Мартынов А. Н., Недоступ А. А. Методика планирования эксперимента по исследованию статического коэффициента трения жгута дели на тяговом барабане механизма фрикционного типа // Известия КГТУ. 2022. № 66. С. 30–39.

Original article

Method of planning experiment on study of the static coefficient of friction of a seine harness on a traction drum of a friction-type mechanism

Aleksey N. Martynov¹, Aleksandr A. Nedostup²

^{1,2}Kaliningrad State Technical University, Kalinigrad, Russia

¹ ajiex94@gmail.com

² nedostup@klgtu.ru

Abstract. The static coefficient of friction is the main characteristic of the fishing gear (FG) interaction with the friction machines. Its changes can lead to sliding of the FG on the surface of the drum(-s) of a machine which leads to negative consequences, such as wear of the FG, increasing time for retrieving, increasing energy consumption, etc. Currently, there are precise methods for determining the static coefficient of friction only for thread-rope products (TRP). The article presents a description and planning of the experiment with seine to determine this coefficient in relation to the seine. Experiments have been performed in laboratory conditions to comply with the TRP methodology. To carry out the research, samples of seine have been prepared from three different materials (polyamide, polypropylene, polyester) of the same diameter (2 mm), which will interact with three steel drums of different diameters (104 mm, 128 mm, 152mm). In addition, different contact arc angles (90 deg, 135 deg, 180 deg) have been taken into account. To implement this experiment, a special installation based on the strain station MIC-200 and electric motor simulating the drive of the drum of seine-hauling mechanism has been designed by the Department of Industrial Fisheries. By means of strain gauge the value of the maximum tension of the seine incoming branch (S_1) will be recorded and graphical dependences of S_1 on the time of the experiment (t) will be plotted. Using the obtained data, we calculate the coefficient of friction in two different ways, classical and by the formula of Nedostup and Orlov. Further, the calculated results will be compared and the corresponding conclusions will be drawn.

Keywords: static coefficient of friction, seine, slip, friction, friction-type mechanism, experiments, tension, planning, incoming branch

For citation: Martynov A. N., Nedostup A. A. Method of planning experiment on study of the static coefficient of friction of a seine harness on a traction drum of a friction-type mechanism. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2022;(66):30–39.(In Russ.).

ВВЕДЕНИЕ

Зачастую на промысловых судах, где ОР служит невод, для его выборки применяются фрикционные механизмы. Базируется их работа на силе трения, за счет которой осуществляется взаимодействие ОР и механизма фрикционного типа (МФТ) без проскальзывания (скольжения), удержание ОР на поверхности барабана МФТ. При таком взаимодействии учитывается условие предварительного смещения (сдвигающая нагрузка не должна превышать неполную силу трения).

Н. Е. Жуковский изучал работу ременных передач, имеющих аналогичные с фрикционными механизмами условия взаимодействия. Во время исследований было выдвинуто предположение о разделении дуги контакта как бы на две части.

Первая – дуга скольжения ремня по поверхности блока. Вторая, которой и соответствует статический коэффициент трения, – дуга относительного покоя. В. И. Пожбелко [1], основываясь на этих предположениях, получил следующую формулу, согласующуюся с экспериментальными данными:

$$S_1 = S_2 e^{\mu(\alpha - 38,5d/D)}, \quad (1)$$

где S_1 – натяжение набегающей ветви; S_2 – натяжение сбегающей ветви; μ – статический коэффициент трения; α – угол дуги контакта; d – толщина гибкой связи (ремень, лента, канат и т. д.), охватывающей шкив; D – диаметр шкива.

Дуги покоя и скольжения, описанные Жуковским, были зафиксированы С. И. Полуляком [2]. В своих опытах по изучению фрикционного взаимодействия жгута дели и барабана он использовал лабораторные установки с применением метода электротензометрии.

В настоящее время экспериментальные исследования по изучению статических коэффициентов трения КВИ о поверхности барабанов МФТ проводятся на лабораторных установках. В данных опытных схемах происходит контакт образующей поверхности диска (барабана) и образца (нитки, веревки) сетематериала. Такое взаимодействие воспроизводит физику процесса трения, возникающего во время выборки ОР, и соответствует одному из рекомендованных И. В. Крагельским [3] методов по оценке фрикционных свойств материалов.

Им была представлена следующая формула для расчета коэффициента трения:

$$\mu = \frac{S_{1max} - S_2}{S_{1max} + S_2} = \left(\frac{S_{1max}}{S_2} - 1 \right) / \left(\frac{S_{1max}}{S_2} + 1 \right). \quad (2)$$

А. А. Недоступ и Е. К. Орлов провели ряд экспериментальных исследований по определению статических коэффициентов КВИ при угле обхвата барабана МФТ $40^\circ \leq \alpha \leq 720^\circ$ [4].

На основании полученных данных ими выведена формула (3) для расчета коэффициента трения капроновых крученых КВИ по стальной поверхности МФТ с учетом дуги обхвата. Точность вычислений по ней составляет 95 %, что является достаточно высоким показателем.

$$\mu = 0,6 \sqrt{\frac{(\xi_1 - 1)}{\alpha}}, \quad (3)$$

где $\xi_1 = S_{1max}/S_2$ – напряжение в набегающей ветви; S_{1max} – максимальное значение натяжения в набегающей ветви жгута при отсутствии проскальзывания, μ – коэффициент трения.

Эксперимент, описанный в этой работе, расширит представление об исследованиях, проделанных Недоступом и Орловым, в отношении жгутов делей, изготавливаемых из КВИ.

ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Коэффициент трения зависит от множества факторов. Это можно продемонстрировать следующей функцией:

$$\mu = f(N, d, D, S_1, S_2, l, \alpha, m, W_f, P, \rho, \rho_m, n, SZ, a, A, B, R, T, b_6, X_i), \quad (4)$$

где N – нагрузка на барабан МФТ; d – диаметр нити (веревки); D – диаметр шкива; S_1 – натяжение набегающей ветви; S_2 – натяжение сбегающей ветви; l – длина дуги контакта жгута дели с барабаном МФТ; α – угол дуги контакта;

W_f – фактическая влажность; P – вес сухой дели; P_w – вес мокрой дели; ρ – плотность материала рабочей поверхности МФТ; ρ_m – плотность материала КВИ; n – коэффициент укрута КВИ; SZ – направление крутки; a – шаг ячеей; A – количество ячеей в дели в длину; B – количество ячеей в дели в высоту; R – тип узла вязки; T – поворот узла вязки; b_6 – ширина жгута дели на барабане МФТ; X_i – конструкция барабана МФТ (диаметр шкива барабана, материал покрытия, фактура поверхности и т. д.).

Используя научный метод планирования экспериментов [5, 6], из всех предоставленных факторов были отобраны те, которые оказывают наибольшее влияние на коэффициент трения и которыми можно достаточно свободно управлять во время проведения экспериментов.

d/a – отношение диаметра нити к шагу ячеей. Оно является одной из основных характеристик невода. Так же, при одинаковой высоте экспериментального образца, за счет изменения этого фактора будет изменяться диаметр жгута дели, а следовательно, и поверхность соприкосновения дели с барабаном МФТ. Анализ данных показал, что для кошельковых неводов d/a лежит в пределах 0,020–0,080 в зависимости от части невода (предсливные секции, сливные секции, секции крыла). Для опытов были выбраны следующие показатели: $d/a_1 = 0,025$; $d/a_2 = 0,050$; $d/a_3 = 0,067$.

α – угол дуги контакта жгута дели с барабаном МФТ. Выборка орудий рыболовства механизмами фрикционного типа осуществляется в интервале угла охвата $40^\circ \leq \alpha \leq 720^\circ$. Для удобства проведения опытов были выбраны следующие показатели: $\alpha_1 = 90^\circ$; $\alpha_2 = 135^\circ$; $\alpha_3 = 180^\circ$.

Два этих фактора непосредственно воздействуют на величину площади контакта жгута дели с барабаном МФТ, которая образует поверхность сцепления и имеет огромное влияние на μ .

D – диаметр стального барабана. Конструкция барабана вместе с α составляет главную характеристику работы промышленного неводоуборочного механизма – S_1/S_2 (тяговая или фрикционная). Максимальное (предельное) значение S_1/S_2 зависит в большей степени от барабана(-ов) фрикционной машины. Во время промысла достижение таких условий практически невозможно, поэтому количественный показатель тяговой характеристики МФТ может принимать разные значения из-за влияния различных факторов (количества рыбы, попавшей в невод; погодных условий, свойств самого невода и т. д.). Конструкция барабана (шкива) обуславливается такими показателями, как диаметр, материал покрытия, фактура поверхности, угол обхвата жгутом невода и т. д. Для проведения опытов будут взяты три стальных барабана с разными диаметрами: $D_1=104$ мм; $D_2=128$ мм; $D_3=152$ мм.

Чтобы занести данные факторы в матрицу планирования, произведем кодирование табл. 1 для удобства использования матрицы [7].

Таблица 1. Кодирование факторов

Table 1. Factor coding

№ п/п	Наименование фактора	Обозначение фактора	Кодировка фактора	Нижний уровень фактора (-)	Средний уровень фактора (0)	Верхний уровень фактора (+)
1	Отношение диаметра нити к шагу ячеи	d/a	x_1	0,025	0,050	0,067
2	Угол дуги контакта жгута дели с барабаном МФТ	α	x_2	90	135	180
3	Диаметр стального барабана	D	x_3	104	128	152

В табл. 2 приведена матрица планирования экспериментов по определению коэффициента трения с учетом трех факторов (d/a , α , D) на трех разных уровнях.

Таблица 2. Матрица планирования экспериментов по определению μ

Table 2. Matrix for planning experiments to determine μ

№ п/п	x_1	x_2	x_3
1	2	3	4
1	+	+	+
2	0	+	+
3	-	+	+
4	+	0	+
5	0	0	+
6	-	0	+
7	+	-	+
8	0	-	+
9	-	-	+
10	+	+	0
11	0	+	0
12	-	+	0
13	+	0	0
14	0	0	0
15	-	0	0
16	+	-	0
17	0	-	0
18	-	-	0
19	+	+	-
20	0	+	-
21	-	+	-
22	+	0	-
23	0	0	-
24	-	0	-
25	+	-	-
26	0	-	-
27	-	-	-

Данная матрица планирования создана для проведения опытов с делью, изготовленной из материала одного типа. Для делей, сделанных из двух других материалов, необходимо будет провести подобные опыты, чтобы понять, как материал влияет на коэффициент трения.

ПОДГОТОВКА К ЭКСПЕРИМЕНТУ

Экспериментальное исследование по изучению коэффициента трения будет проводиться с моделями делей, собранных в жгуты. Для этого в лабораторных условиях сконструирована специальная экспериментальная установка (рис. 1).

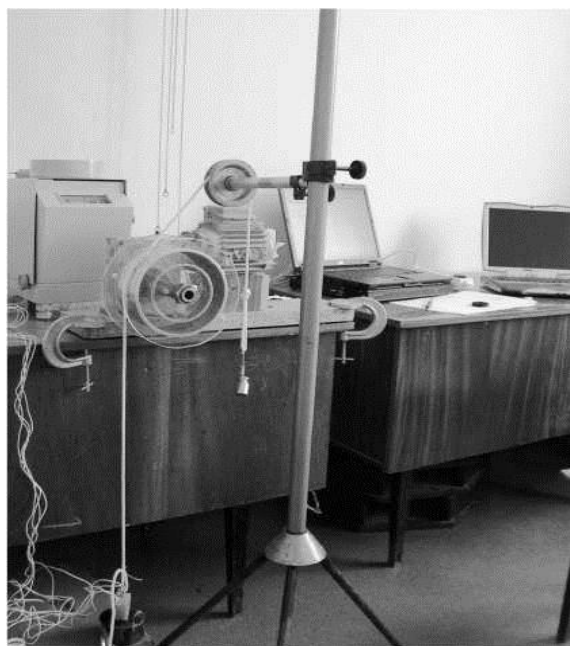


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки
Fig. 1. General view of the experimental installation

Приводом установки является мотор-редуктор: асинхронный электродвигатель (мощность – 0,18 кВт; частота вращения – 1380 об/мин); червячный редуктор (передаточное отношение $i = 53$; частота вращения тихоходного вала 26 об/мин). На тихоходный вал крепится барабан, на который могут быть установлены различные стальные втулки (диаметрами 27, 104, и 152 мм). Реборды барабана выполнены из оргстекла с нанесенной градуировкой на внешней стороне для контроля дуги контакта (от 0 до 180°). Кронштейн фиксируется на вертикальной стойке, на него крепится отводящий ролик (два подшипника качения, с помощью которых он закреплен, исключают влияние ролика на натяжение сбегающей ветви S_2). Сочетание кронштейна и ролика позволяет изменять дугу контакта образца с поверхностью барабана (за счет их перемещения), так как образец также перекидывается через отводящий ролик. На перекинутую ветвь жгута дели крепится мерный груз. Тензостанция МІС-200 фиксирует показания с тензометрического датчика (предел измерения 98,2 Н), который измеряет натяжение набегающей ветви (S_1). Преобразователь частоты ACS350-01E-02A4-2 (0,37 кВт, 220 В) с базовой панелью ACS-CP-C J404 управляет электродвигателем (диапазон регули-

ровки угловой скорости барабана $0 < \omega < 0,43 \text{ с}^{-1}$). Дополнительно имеются весы для определения массы образцов (предел взвешивания 0,5 кг).

Эксперимент будет проводиться с несколькими элементами сетных полотен, изготовленными из КВИ различных материалов, приведенных в табл. 3. Для равных условий высота каждого элемента полотна одинакова (составляет 1 м). Количество ячеей для образцов рассчитано по формуле (5):

$$n=L/2a, \quad (5)$$

где n – количество ячеей в высоту; L – высота образца; a – шаг ячеей.

Таблица 3. Образцы ниток и веревок при фактической влажности $W_f = 1,72 \%$

Table 3. Thread and rope samples at actual moisture $W_f = 1,72 \%$

№ п/п	Материал	Вид	Номер образца	Диаметр d , мм	Разрывная нагрузка T_p , Н
1	Полиамид (капрон) ПА	Нитка крученая	1	2	833,6
2	Полиэфир (полиэстер) ПЭ	Нитка крученая	2	2	882,6
3	Полипропилен ПП	Нитка крученая	3	2	372,7

Параметры для образцов сетных полотен были подобраны в соответствии с существующими делами, применяемыми на промысле. Для проведения опытов в равных условиях каждый образец имеет массу 52,6 г. Во всех экспериментах приложена одинаковая масса на сбегющую ветвь (1006,5 г). Параметры сетных образцов представлены в табл. 4.

Таблица 4. Параметры образцов

Table 4. Sample parameters

Номер образца	Материал	d/a	a
1	ПА	0,025	80
2	ПА	0,050	40
3	ПА	0,067	30
4	ПП	0,025	80
5	ПП	0,050	40
6	ПП	0,067	30
7	ПЭ	0,025	80
8	ПЭ	0,050	40
9	ПЭ	0,067	30

На рис. 2-4 можно видеть изображения изготовленных сетных образцов. Под номерами 1, 4, 7 они выполнены из ПА; 2, 5, 8 – из ПП; 3, 6, 9 – из ПЭ. Разная длина образцов не имеет значения, так как их масса одинакова. Главное было обеспечить перекрытие барабана экспериментальной установки при $\alpha = 180^\circ$.



Рис. 2. Образцы сетных полотен с шагом ячеи 30 мм
Fig. 2. Samples of mesh webs with a mesh pitch of 30 mm

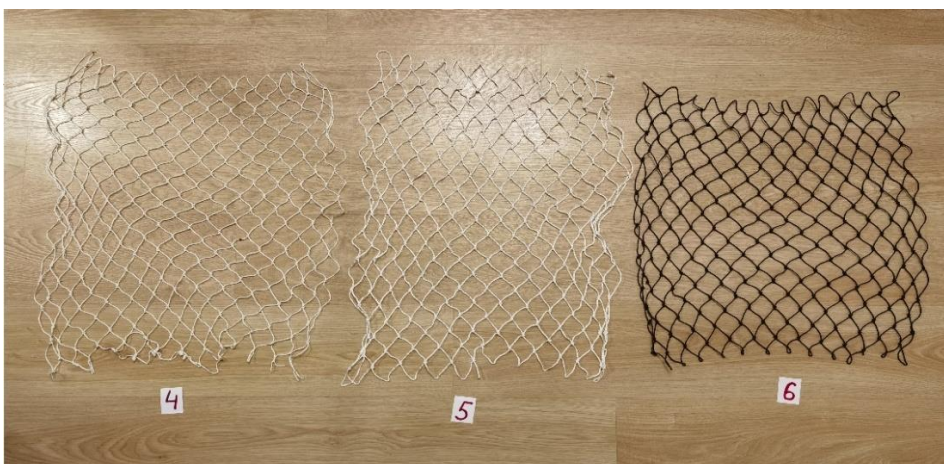


Рис. 3. Образцы сетных полотен с шагом ячеи 40 мм
Fig. 3. Samples of mesh webs with a mesh pitch of 40 mm



Рис. 4. Образцы сетных полотен с шагом ячеи 80 мм
Fig. 4. Samples of mesh webs with a mesh pitch of 80 mm

ПРЕДПОЛАГАЕМЫЕ ПОЛУЧЕННЫЕ ДАННЫЕ

При помощи тензодатчика будет измеряться натяжение в набегающей ветви жгута S_1 . Результаты измерений записываются тензостанцией в течение времени проведения эксперимента t . Данные действия будут повторяться для каждого образца сетного полотна. По результатам экспериментов мы должны получить и построить зависимости вида $S_1 = f(t)$, где фиксируется максимальное значение $S_{1\max}$.

Используя полученные данные, применим формулу (2) и выполним расчет коэффициента трения μ .

Далее будет проведено сравнение результатов значений μ по формуле (2) и формуле А. А. Недоступа и Е. К. Орлова (3), на основе которого мы сделаем выводы о возможной доработке формулы по определению коэффициента трения для неводной сети и наметим ход дальнейших исследований в области этих экспериментов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В проведенной работе показывается зависимость коэффициента трения от огромного количества факторов (4), из которых методом планирования были отобраны те, что оказывают на него наибольшее влияние: d/a – отношение диаметра нити к шагу ячеи, который составляет главную характеристику дели; α – угол контакта жгута дели с барабаном МФТ; D – диаметр стального барабана МФТ, два последних являются главной характеристикой барабана неводовыборочного механизма.

Также разработана методика проведения многофакторного эксперимента, позволяющая получить значения натяжения набегающей ветви (S_1), величина которых зависит от сочетания выбранных факторов (d/a ; α ; D) и которые характеризуют показатель статического коэффициента трения жгута дели на тяговом барабане механизма фрикционного типа.

Список источников

1. Пожбелко В. И. Силовые закономерности упруго-деформируемой ременной передачи (новая постановка задачи Эйлера) // Проблемы машиностроения. 2000. № 3. С. 56–62.
2. Полуляк С. И. Исследование тяговых свойств рабочих органов неводовыборочных машин методом тензометрии // Рыбное хозяйство. 1966. № 3. С. 42–45.
3. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. Москва: Машиностроение. 1977.
4. 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.
5. Howard J. S. Experimental Design and Analysis. USA: 2018. 414 с.
6. Хамханов К. М. Основы планирования эксперимента: методическое пособие. Улан-Удэ, 2006. 94 с.
7. Холодов В. И. Планирование экспериментов в гидробиологических исследованиях. Симферополь: Н. Оріанда, 2016. 196 с.

References

1. Pozhbelko V. I. Silovye zakonomernosti uprugodeformiruemoy remennoy peredachi (novaya postanovka zadachi Eylera) [Power laws of elastic-deformable belt transmission (new formulation of the Euler problem)]. *Problemy mashinostroeniya*, 2000, no. 3, pp. 56–62.
2. Polulyak S. I. Issledovanie tyagovykh svoystv rabochikh organov nevodovyborychnykh mashin metodom tenzometrii [Investigation of the traction properties of the working parts of seine traction machines by the tensometric method]. *Rybnoe khozyaystvo*, 1966, no. 3, pp. 42–45.
3. Kragel'skiy I. V., Dobychin M. N., Kombalov V. S. *Osnovy raschetov na trenie i iznos* [Fundamentals of friction and wear calculations]. Moscow, Mashinostroenie, 1977.
4. Nedostup A. A., Orlov E. K. Issledovanie staticheskogo koeffitsienta treniya rybolovnykh kanatno-verevchnykh izdeliy na barabane mekhanizma friktsionnogo tipa [Study of the static coefficient of friction of thread-rope products on the drum of a friction-type mechanism]. *Trenie i iznos*, 2010, vol. 3, no. 4, pp. 403–411.
5. Howard J. S. *Experimental Design and Analysis*. USA, 2018, 414 p.
6. Hamhanov K. M. *Osnovy planirovaniya eksperimenta: metodicheskoe posobie* [Planning of experiment basics: methodological guide]. Ulan-Ude, 2006, 94 p.
7. Kholodov V. I. *Planirovanie eksperimentov v gidrobiologicheskikh issledovaniyakh* [Planning of experiments in hydrobiological research]. Simferopol', N. Orianda Publ., 2016, 196 p.

Информация об авторах

А. Н. Мартынов – аспирант кафедры промышленного рыболовства

А. А. Недоступ – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой промышленного рыболовства

Information about the authors

A. N. Martynov – Post-graduate student of the Department of Industrial Fisheries

A. A. Nedostup – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Industrial Fisheries

Статья поступила в редакцию 29.11.2021; одобрена после рецензирования 13.12.2021; принята к публикации 15.07.2022

The article was submitted 29.11.2021; approved after reviewing 13.12.2021; accepted for publication 15.07.2022