

DOI: 10.24143/2073-5529-2020-1-77-85  
УДК 639.2.081.117.21

## ОБОСНОВАНИЕ ПРАВИЛ ПОДОБИЯ ИЗГИБНОЙ ЖЕСТКОСТИ РЫБОЛОВНЫХ КРУЧЕНЫХ ИЗДЕЛИЙ<sup>1</sup>

*А. А. Недоступ, К. В. Коновалова, П. В. Насенков, А. О. Ражев, С. В. Федоров*

*Калининградский государственный технический университет,  
Калининград, Российская Федерация*

В контексте решения проблемы физического моделирования рыболовных крученых нитевидных материалов рассматривается вопрос обоснования правил подобия изгибной жесткости нитевидных изделий (НИ). Данные проблемы обусловлены, во-первых, масштабностью, высокой стоимостью и сложностью инженерных сооружений в промышленном рыболовстве, в связи с чем их практически невозможно испытывать только в натуральных условиях; во-вторых, отсутствием систематических опытов по измерению изгибной жесткости синтетических канатно-веревочных изделий. Таким образом, возникает необходимость в проведении модельных экспериментов, связанных с физическим моделированием динамических процессов, которые протекают в рыболовных крученых изделиях, а также в подробном изучении теории подобия. В качестве исследовательской задачи была предпринята попытка оценить изгибную жесткость натурального объекта из полиамида (с диаметром 10 мм, длиной изделия и диаметром штыря, определенными с помощью масштабных физических характеристик) на основе анализа экспериментальных данных изгибной жесткости синтетических НИ из полиамида различного диаметра и длины (длиной 0,08; 0,10; 0,12; 0,16; 0,20 и 0,24 м при диаметре 1,1; 2,0; 3,1; 4,0; 5,0 и 6,0 мм), определенной на штырях диаметром 2, 10 и 30 мм. Полученные данные позволят подтвердить правильность использования теории динамического подобия при обосновании правил подобия изгибной жесткости НИ и дадут возможность без проведения экспериментов на канатно-веревочных изделиях большого диаметра определять их основные физико-механические свойства, которые необходимы для моделирования орудий промышленного рыболовства.

**Ключевые слова:** орудия промышленного рыболовства, нитевидные изделия, физико-механические свойства, физическое моделирование, правила подобия, изгибная жесткость, канатно-веревочные изделия, диаметр, полиамид.

**Для цитирования:** Недоступ А. А., Коновалова К. В., Насенков П. В., Ражев А. О., Федоров С. В. Обоснование правил подобия изгибной жесткости рыболовных крученых изделий // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2020. № 1. С. 77-85. DOI: 10.24143/2073-5529-2020-1-77-85.

### Введение

Натурные объекты в промышленном рыболовстве представляют собой слишком сложные, дорогостоящие инженерные сооружения, чтобы их можно было всякий раз испытывать только в натуральных условиях. Это привело к широкому использованию в промышленном рыболовстве теории подобия [1, 2]. Физические модели орудий промышленного рыболовства, а также их элементов не только наглядно демонстрируют протекающие в реальности процессы, но с их помощью можно также изучить влияние отдельных параметров на течение физических процессов. Но следует помнить, что модель должна не только воспроизводить изучаемое явление, но и моделировать это явление так, чтобы от данных с моделью можно было перейти к реальному объекту. Все это достигается за счет равенства для модели и изучаемого объекта критериев подобия. Критерии подобия – это безразмерные числа, зависящие от геометрических, физических параметров. Для обеспечения эффективности любых экспериментальных исследований следует организовать их так, чтобы можно было определить критерии подобия и представить полученные результаты виде функциональной зависимости. Большое значение приобрела теория физического моделирования динамических процессов [3, 4], поскольку в эксперименте наблюдаются явления в частных условиях при статических процессах, а требуется получить общие закономерности для всего класса подобных явлений в широком диапазоне условий, применяемых при динамических процессах.

<sup>1</sup> Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Калининградской области в рамках научного проекта № 19-48-390004.

Теории физического моделирования при статических процессах рассматривались достаточно широко [1, 2], в то же время ряд вопросов, связанных с правилами подобия при постановке динамических задач, до настоящего времени остается мало разработанным. К этим вопросам, прежде всего, можно отнести неполноту информации при рассмотрении физико-механических свойств (ФМС) нитевидных изделий (НИ), в частности изгибной жесткости  $EJ$ .

В статьях «Критерии изгибной жесткости сетеснастных материалов при моделировании орудий лова» [5] и «О моделировании упругости канатов в динамических рыболовных системах» [6] А. Л. Фридман, рассматривая динамическое подобие, также поднимает вопрос о проведении систематических опытов по изучению изгибной жесткости  $EJ$  канатно-веревочных изделий (КВИ). В работе [7] Б. И. Герман изучал жесткость сетного полотна в потоке. Жесткость системы при задеве трала изучала В. Н. Стрекалова [8]. В настоящее время исследуют жесткость КВИ с помощью МКЭ [9].

При всей значимости вышеперечисленных работ, они не исчерпывают многих проблем, важность которых увеличилась в последнее время в связи с развитием и внедрением новых технологий конструирования орудий рыболовства. В результате изучения различных источников мы пришли к выводу, что для обоснования правил подобия ФМС НИ при динамической постановке задачи следует использовать теорию динамического подобия А. А. Недоступа [3].

### Постановка задачи

Исследования ФМС НИ и КВИ на специальных установках становятся эффективным инструментом в решении разнообразных проблем жесткости, прогноза надежности и ресурса КВИ, работающих в условиях износа, усталости, динамических и ударных нагрузок, в условиях низких температур и хрупкого разрушения широкого круга материалов, которые используются при конструировании орудий промышленного рыболовства.

В табл. 1 приведены основные масштабы физических характеристик гидродинамических, грунтодинамических, механических и трибологических процессов, протекающих с НИ.

Таблица 1

Масштабы физических характеристик

Физические характеристики	Обозначение	Преобразование через масштаб $C_l$
Геометрический параметр: длина, диаметр; площадь; объем	$C_l$	$C_l$
	$C_A$	$C_l^2$
	$C_V$	$C_l^3$
	$C_m$	$C_l^3$
Масса	$C_m$	$C_l^3$
Время	$C_t$	$C_l^{3/4}$
Скорость	$C_v$	$C_l^{-1/4}$
Сила	$C_R$	$C_l^{3/2}$
Ускорение	$C_w$	$C_l^{-3/2}$
Объемный вес	$C_\gamma$	$C_l^{-3/2}$
Плотность	$C_\rho$	1
Изгибная жесткость	$C_{EJ}$	$C_l^{7/2}$
Упругость материала	$C_E$	$C_l^{1/2}$
Угол	$C_\alpha = C_{\text{фвн}}$	1
Относительное удлинение	$C_\epsilon$	1

Масштаб изгибной жесткости  $C_{EJ}$  КВИ и НИ определяется на основе табл. 1 и следующего выражения:

$$C_{EJ} = C_l^{7/2}. \quad (1)$$

Следует отметить, что вопросу изучению изгибной жесткости КВИ уделяется особое внимание, что связано с износом и прочностью КВИ, и А. Л. Фридман в [5] указывал на то, что необходимо проводить полномасштабные исследования модуля упругости КВИ и, соответственно, изгибной жесткости КВИ.

### Материалы исследования

Для постановки динамической задачи исследования  $EJ$  КВИ мы воспользовались данными исследования  $EJ$  (рис. 1), выполненного в 2019 г. на кафедре промышленного рыболовства Калининградского государственного технического университета, с НИ из различного синтетического сырья.



Рис. 1. Пример изогнутости НИ на стальном штыре диаметром 30 мм

В табл. 2 представлена часть экспериментальных данных, определенных на штырях диаметром 2,0; 10,0 и 30,0 мм: для нитевидных изделий из полиамида (ПА) длиной 0,08; 0,10; 0,12; 0,16; 0,20 и 0,24 м, диаметром 1,1; 2,0; 3,1; 4,0; 5,0 и 6,0 мм; полипропилена (ПП) длиной 0,08; 0,10; 0,12; 0,16; 0,20 и 0,24 м, диаметром 1,1; 2,0; 3,1; 4,0 мм; полиэфира (ПЭФ) длиной 0,08; 0,10; 0,12; 0,16; 0,20 и 0,24 м, диаметром 1,20; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0 и 6,0 мм.

Таблица 2

Экспериментальные значения изгибной жесткости  $EJ_M$  нитевидных изделий

Образец	Длина образца, $l_m$ , м	Масса образца, $m_m$ , кг	$EJ_M, \text{Нм}^2$			Среднее значение, $EJ_M, \text{Нм}^2$
			Диаметр штыря, $D$ , мм			
			2,0	10,0	30,0	
Полиамид (ПА), $d = 1,1$ мм	0,08	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$6,6 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$
	0,10	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$5,9 \cdot 10^{-6}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$
	0,12	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^{-5}$
	0,16	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$5,5 \cdot 10^{-5}$
	0,20	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$4,8 \cdot 10^{-5}$	$3,3 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$
	0,24	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$7,2 \cdot 10^{-5}$	$4,5 \cdot 10^{-5}$	$2,4 \cdot 10^{-4}$
Полиамид (ПА), $d = 2,0$ мм	0,08	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	–	$1,3 \cdot 10^{-4}$
	0,10	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	–	$1,2 \cdot 10^{-4}$
	0,12	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$3,6 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$
	0,16	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$6,3 \cdot 10^{-5}$	$6,4 \cdot 10^{-5}$
	0,20	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-4}$	$9,2 \cdot 10^{-5}$	$5,8 \cdot 10^{-4}$
	0,24	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$5,7 \cdot 10^{-4}$
Полиэфир (ПЭФ), $d = 1,2$ мм	0,08	$1,0 \cdot 10^{-4}$	–	–	–	–
	0,10	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	–	–	$1,6 \cdot 10^{-4}$
	0,12	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$9,2 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$	$3,7 \cdot 10^{-4}$
	0,16	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$2,4 \cdot 10^{-4}$
	0,20	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$7,1 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-5}$	$2,9 \cdot 10^{-4}$
	0,24	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$8,6 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$3,6 \cdot 10^{-4}$
Полиэфир (ПЭФ), $d = 2,0$ мм	0,08	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$5,9 \cdot 10^{-5}$	–	–	–
	0,10	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$	–	–	–
	0,12	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$3,9 \cdot 10^{-4}$	$3,3 \cdot 10^{-4}$	–	$3,6 \cdot 10^{-4}$
	0,16	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$6,9 \cdot 10^{-4}$	$8,2 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-4}$
	0,20	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$6,4 \cdot 10^{-4}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$
	0,24	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$8,2 \cdot 10^{-4}$
Полипропилен (ПП), $d = 1,1$ мм	0,08	$1,0 \cdot 10^{-4}$	–	–	–	–
	0,10	$1,0 \cdot 10^{-4}$	–	–	–	–
	0,12	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$8,7 \cdot 10^{-5}$	$9,9 \cdot 10^{-5}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$	$7,5 \cdot 10^{-5}$
	0,16	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$
	0,20	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$4,2 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-5}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$
	0,24	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$9,9 \cdot 10^{-7}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$6,3 \cdot 10^{-5}$	$6,1 \cdot 10^{-5}$
Полипропилен (ПП), $d = 2,0$ мм	0,08	$2,0 \cdot 10^{-4}$	–	–	–	–
	0,10	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$4,9 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$
	0,12	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$3,1 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$2,8 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$
	0,16	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$9,3 \cdot 10^{-5}$	$3,9 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$
	0,20	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$5,7 \cdot 10^{-4}$	$8,4 \cdot 10^{-5}$	$4,7 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$
	0,24	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$2,9 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$6,4 \cdot 10^{-4}$

Также необходимо отметить, что некоторые образцы при малых значениях длины и увеличении диаметра штыря не подвергаются значительному изгибу.

Экспериментальные значения  $EJ, \text{Нм}^2$ , для полиамида (ПА) длиной 0,08; 0,10; 0,12; 0,16; 0,20 и 0,24 м, диаметром 1,1; 2,0; 3,1; 4,0; 5,0 и 6,0 мм нанесены на координатные плоскости (рис. 2–4).

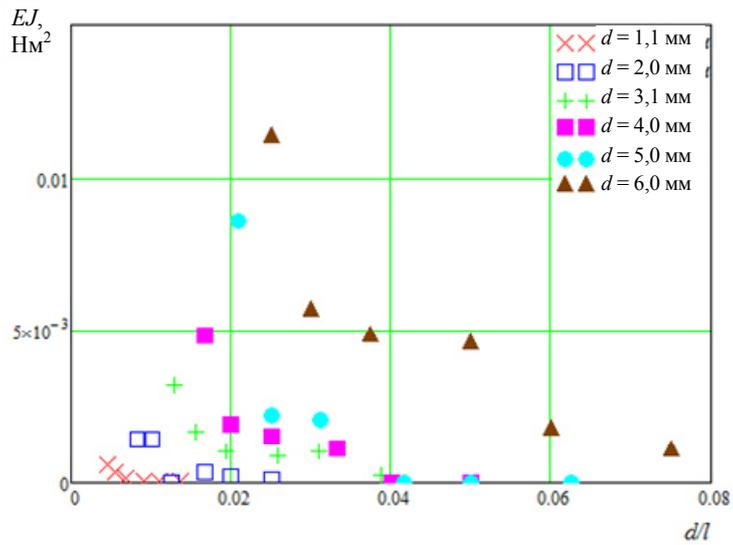


Рис. 2. Экспериментальные данные  $EJ = f(d/l)$ ,  $D = 2$  мм, ПА

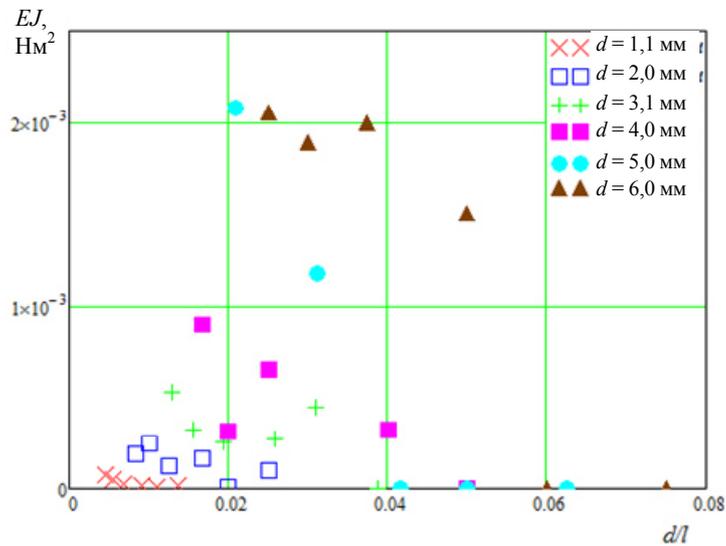


Рис. 3. Экспериментальные данные  $EJ = f(d/l)$ ,  $D = 10$  мм, ПА

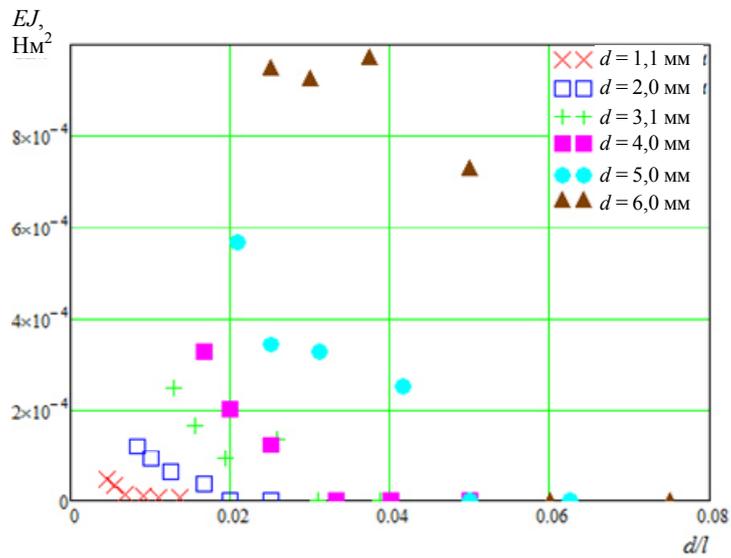


Рис. 4. Экспериментальные данные  $EJ = f(d/l)$ ,  $D = 30$  мм, ПА

Так как общепринятым, главным параметром КВИ обычно является диаметр, рассмотрим на его примере подобие модели и природы. Для этого из табл. 3 возьмем значение диаметра натурального НИ  $d_n$ , применяемого для постройки орудий рыболовства, и произведем расчеты для определения его изгибной жесткости  $EJ_n$ .

Таблица 3

**Диаметр натуральных канатно-веревочных изделий**

Натурный образец	Диаметр, $d_n$ , мм
Канат полиамидный трехрядный	8,0
	10,0
	11,0
Канат полиэфирный трехрядный	8,0
	10,0
	11,0
Канат полипропиленовый трехрядный	8,0
	10,0
	11,0

Для дальнейшего расчета воспользуемся значением изгибной жесткости  $EJ_m$  из табл. 1, где приведены основные масштабы физических характеристик процессов, протекающих с НИ:

$$C_{EJ} = C_l^{7/2} = C_{EJ} \rightarrow EJ_m / EJ_n \tag{2}$$

Для определения масштаба линейных размеров  $C_l$  воспользуемся равенством

$$C_d = d_m / d_n = l_m / l_n \tag{3}$$

где  $C_d$  – безразмерный диаметр;  $d_m$  – диаметр модели;  $d_n$  – диаметр натурального НИ;  $l_m$  – длина модели;  $l_n$  – длина натурального НИ;

$$C_l = l_m / l_n.$$

Все полученные данные подставляем в формулу  $EJ_n = EJ_m / C_{EJ}$ .

На основании формул (2) и (3) определим расчетные значения  $C_d$ ,  $C_{EJ}$  и изгибную жесткость  $EJ_n$  для натурального образца из полиамида  $d_n = 10$  мм (см. табл. 3), для этого воспользуемся экспериментальными данными, часть из которых представлена в табл. 2.

Полученные данные запишем в табличном виде (табл. 4), где  $EJ_m$  рассматривается при диаметре штыря ( $D_m$ ) 2 мм и 10 мм; также необходимо еще раз отметить, что некоторые образцы при малых значениях длины и увеличении диаметра штыря не подвергаются значительному изгибу.

Таблица 4

**Расчетные значения изгибной жесткости  $EJ$  для каната из полиамида диаметром 10 мм**

Образец	Экспериментальные данные				$C_l = C_d$	$C_{EJ}$	Расчетные значения для ПА $d_n = 10$ мм	
	Длина, $l_m$ , м	Масса образца, $m$ , кг	$EJ_m$ , Нм <sup>2</sup>				$EJ_n$ , Нм <sup>2</sup>	
			$D_m = 2$ мм	$D_m = 10$ мм			$D_m = 2$ мм	$D_m = 10$ мм
ПА $d_m = 1,1$ мм	0,08	$4,0 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$5,3 \cdot 10^{-5}$	0,11	$4,4 \cdot 10^{-4}$	$3,1 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$
	0,10	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$3,1 \cdot 10^{-5}$	$5,9 \cdot 10^{-5}$			$7,1 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$
	0,12	$6,0 \cdot 10^{-5}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$			$5,4 \cdot 10^{-2}$	$2,6 \cdot 10^{-2}$
	0,16	$9,0 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$			3,6	$4,0 \cdot 10^{-2}$

Окончание табл. 4

Образец	Экспериментальные данные				$C_l = C_d$	$C_{EJ}$	Расчетные значения для ПА $d_n = 10$ мм	
	Длина, $l_n$ , м	Масса образца, $m_n$ , кг	$EJ_n$ , Нм <sup>2</sup>				$EJ_n$ , Нм <sup>2</sup>	
			$D_n = 2$ мм	$D_n = 10$ мм			$D_n = 2$ мм	$D_n = 10$ мм
ПА $d_n = 2$ мм	0,08	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$7,8 \cdot 10^{-5}$	$6,5 \cdot 10^{-5}$	0,20	$3,6 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$
	0,1	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$8,2 \cdot 10^{-5}$			$4,9 \cdot 10^{-2}$	$2,3 \cdot 10^{-2}$
	0,12	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$			$8,9 \cdot 10^{-2}$	$4,3 \cdot 10^{-2}$
	0,16	$2,6 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$			0,30	$3,0 \cdot 10^{-2}$
ПА $d_n = 3,1$ мм	0,08	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	–	0,31	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	–
	0,10	$3,75 \cdot 10^{-4}$	$9,7 \cdot 10^{-4}$	$4,1 \cdot 10^{-4}$			$5,8 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$
	0,12	$4,5 \cdot 10^{-4}$	$7,9 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{-4}$			$4,8 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$
	0,16	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$			$6,3 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$
ПА $d_n = 4$ мм	0,08	$5,0 \cdot 10^{-4}$	–	–	0,40	$4,0 \cdot 10^{-2}$	–	–
	0,10	$6,25 \cdot 10^{-4}$	–	$3,3 \cdot 10^{-4}$			–	$8,3 \cdot 10^{-3}$
	0,12	$7,5 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$			$2,9 \cdot 10^{-2}$	$3,6 \cdot 10^{-2}$
	0,16	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$7,2 \cdot 10^{-4}$			$4,2 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$
ПА $d_n = 5$ мм	0,08	$7,8 \cdot 10^{-4}$	–	–	0,50	$8,8 \cdot 10^{-2}$	–	–
	0,10	$9,7 \cdot 10^{-4}$	–	–			–	–
	0,12	$1,16 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$6,4 \cdot 10^{-3}$			0,28	$7,3 \cdot 10^{-2}$
	0,16	$1,56 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$			$2,8 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$
ПА $d_n = 6$ мм	0,08	$1,12 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	–	0,60	0,17	$6,9 \cdot 10^{-3}$	–
	0,10	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	–			$1,1 \cdot 10^{-2}$	–
	0,12	$1,68 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$			$1,9 \cdot 10^{-2}$	$9,4 \cdot 10^{-3}$
	0,16	$2,24 \cdot 10^{-2}$	$5,2 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$			$3,1 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$

Для подтверждения теории подобия воспроизведем эксперимент по исследованию  $EJ$ , выполненный в 2019 г. на кафедре промышленного рыболовства, для каната из полиамида  $d_n = 10$  мм, длиной изделия и диаметром штыря, определенных согласно масштабным физическим характеристикам из табл. 2.

Полученные экспериментальные значения представлены в табл. 5

Таблица 5

Экспериментальные значения изгибной жесткости  $EJ$  для каната из полиамида диаметром 10 мм

Образец	Длина образца, $l_n$ , м	Масса образца, $m_n$ , кг	Экспериментальные значения для ПА $d_n = 10$ мм			
			при $D_n = 2$ мм		при $D_n = 10$ мм	
			Диаметр штыря, $D_n$ , м	$EJ_n$ , Нм <sup>2</sup>	Диаметр штыря, $D_n$ , м	$EJ_n$ , Нм <sup>2</sup>
ПА $d_n = 10$ мм	0,73	$2,8 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$	0,35	$9,0 \cdot 10^{-2}$	$8,3 \cdot 10^{-2}$
	0,91	$3,6 \cdot 10^{-2}$		0,71		0,22
	1,09	$4,3 \cdot 10^{-2}$		1,73		0,41
	1,454	$5,7 \cdot 10^{-2}$		3,62		1,28
	0,40	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$7,1 \cdot 10^{-2}$	$5,0 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-2}$
	0,50	$2,0 \cdot 10^{-2}$		0,13		$3,2 \cdot 10^{-2}$
	0,60	$2,3 \cdot 10^{-2}$		0,29		$5,4 \cdot 10^{-2}$
	0,80	$3,1 \cdot 10^{-2}$		0,69		0,17
	0,26	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$6,0 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-2}$	$7,1 \cdot 10^{-3}$
	0,32	$1,3 \cdot 10^{-2}$		$4,4 \cdot 10^{-2}$		$8,6 \cdot 10^{-3}$
	0,39	$1,5 \cdot 10^{-2}$		$9,3 \cdot 10^{-2}$		$1,9 \cdot 10^{-2}$
	0,52	$2,0 \cdot 10^{-2}$		0,20		$4,1 \cdot 10^{-2}$
	0,20	$7,8 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$
	0,25	$9,7 \cdot 10^{-3}$		$3,3 \cdot 10^{-2}$		$4,7 \cdot 10^{-3}$
	0,30	$1,17 \cdot 10^{-2}$		$4,2 \cdot 10^{-2}$		$12,9 \cdot 10^{-3}$
	0,40	$1,56 \cdot 10^{-2}$		0,12		$2,9 \cdot 10^{-2}$
	0,16	$6,24 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$3,7 \cdot 10^{-3}$
	0,20	$7,8 \cdot 10^{-3}$		$5,7 \cdot 10^{-2}$		$4,5 \cdot 10^{-3}$
	0,24	$9,36 \cdot 10^{-3}$		$3,3 \cdot 10^{-2}$		$7,5 \cdot 10^{-3}$
	0,32	$1,25 \cdot 10^{-2}$		$4,6 \cdot 10^{-2}$		$1,7 \cdot 10^{-2}$
	0,13	$5,2 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$	–	$1,6 \cdot 10^{-2}$	–
	0,17	$6,5 \cdot 10^{-3}$		1,615		$1,3 \cdot 10^{-2}$
	0,20	$7,8 \cdot 10^{-3}$		$3,9 \cdot 10^{-2}$		$7,2 \cdot 10^{-3}$
	0,27	$1,04 \cdot 10^{-2}$		$6,1 \cdot 10^{-2}$		$1,2 \cdot 10^{-2}$

Сравним полученные значения изгибной жесткости для каната  $d_n = 10$  мм из табл. 4 и 5. Для этого сведем экспериментальные и расчетные значения в табличную форму (табл. 6).

**Экспериментальные и расчетные значения изгибной жесткости  
для НИ из полиамида диаметром 10 мм**

Образец	Экспериментальные значения			Расчетные значения		
	Масса образца, $m_n$ , кг	$EJ_n$ , Нм <sup>2</sup>		Масса образца, $m_n$ , кг	$EJ_n$ , Нм <sup>2</sup>	
		$D_n = 2$ мм	$D_n = 10$ мм		$D_n = 2$ мм	$D_n = 10$ мм
ПА, $d_n = 10$ мм	$2,8 \cdot 10^{-2}$	0,35	$8,3 \cdot 10^{-2}$	$3,0 \cdot 10^{-2}$	$3,8 \cdot 10^{-2}$	$3,9 \cdot 10^{-2}$
	$3,6 \cdot 10^{-2}$	0,71	0,22	$3,7 \cdot 10^{-2}$	$7,1 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$
	$4,3 \cdot 10^{-2}$	1,73	0,41	$4,4 \cdot 10^{-2}$	$5,4 \cdot 10^{-2}$	$2,6 \cdot 10^{-2}$
	$5,7 \cdot 10^{-2}$	3,62	1,28	$6,0 \cdot 10^{-2}$	0,24	$6,0 \cdot 10^{-2}$
	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$7,1 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-2}$	$1, \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$
	$2,0 \cdot 10^{-2}$	0,13	$3,2 \cdot 10^{-2}$	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$4,9 \cdot 10^{-2}$	$2,3 \cdot 10^{-2}$
	$2,3 \cdot 10^{-2}$	0,29	$5,4 \cdot 10^{-2}$	$2,3 \cdot 10^{-2}$	$8,9 \cdot 10^{-2}$	$4,3 \cdot 10^{-2}$
	$3,1 \cdot 10^{-2}$	0,69	0,17	$3,2 \cdot 10^{-2}$	0,30	$4,9 \cdot 10^{-2}$
	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$2,7 \cdot 10^{-2}$	$7,1 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	–
	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$4,4 \cdot 10^{-2}$	$8,6 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$5,8 \cdot 10^{-2}$	$9,8 \cdot 10^{-3}$
	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$9,3 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$4,8 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$
	$2,0 \cdot 10^{-2}$	0,20	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$6,3 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-2}$
	$7,8 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$7,8 \cdot 10^{-3}$	–	–
	$9,7 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-2}$	$4,7 \cdot 10^{-3}$	$9,7 \cdot 10^{-3}$	–	$8,3 \cdot 10^{-3}$
	$1,17 \cdot 10^{-2}$	$4,2 \cdot 10^{-2}$	$12,9 \cdot 10^{-3}$	$1,17 \cdot 10^{-2}$	$2,9 \cdot 10^{-2}$	$3,6 \cdot 10^{-2}$
	$1,56 \cdot 10^{-2}$	0,12	$2,9 \cdot 10^{-2}$	$1,56 \cdot 10^{-2}$	$4,2 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$
	$6,24 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$3,7 \cdot 10^{-3}$	$6,3 \cdot 10^{-3}$	–	–
	$7,8 \cdot 10^{-3}$	$5,7 \cdot 10^{-2}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$7,8 \cdot 10^{-3}$	–	–
	$9,36 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-2}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$9,3 \cdot 10^{-3}$	$8,7 \cdot 10^{-2}$	$6,1 \cdot 10^{-3}$
	$1,25 \cdot 10^{-2}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-2}$	$1,25 \cdot 10^{-2}$	$2,8 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$
$5,2 \cdot 10^{-3}$	–	–	$6,0 \cdot 10^{-3}$	$6,9 \cdot 10^{-3}$	–	
$6,5 \cdot 10^{-3}$	1,615	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$6,5 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	–	
$7,8 \cdot 10^{-3}$	$3,9 \cdot 10^{-2}$	$7,2 \cdot 10^{-3}$	$7,8 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$9,4 \cdot 10^{-3}$	
$1,04 \cdot 10^{-2}$	$6,1 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$1,04 \cdot 10^{-2}$	$3,1 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	

Анализируя полученные данные, необходимо отметить, что масса образцов малой длины перестает соответствовать требованиям масштабов физических характеристик, приведенным в табл. 1, т. е.

$$C_m \neq C_l^3.$$

В связи с этим можно отметить, что моделирование по формуле (1) адекватно воспроизводит изгибную жесткость при соблюдении масштаба подобия физических характеристик (см. табл. 1).

### Заключение

Таким образом, использование теории динамического подобия А. А. Недоступа при обосновании правил подобия ФМС НИ позволяет определять их основные ФМС, необходимые для моделирования орудий промышленного рыболовства, без проведения экспериментов на НИ большого диаметра. Вместе с тем следует отметить, что несмотря на полноту перечня критериев подобия обеспечение абсолютного подобия совершенно невозможно, как невозможно изучение любых явлений или процессов во всей их полноте.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов Ф. И. Моделирование рыболовных орудий // Рыбное хозяйство. 1940. № 5. С. 32–33.
2. Фридман А. Л. Теория и проектирование орудий промышленного рыболовства. М.: Лег. и пищ. пром-сть, 1981. 327 с.
3. Недоступ А. А. Физическое моделирование гидродинамических процессов движения орудий рыболовства // Вестн. Том. гос. ун-та. Математика и механика. 2012. № 3 (19). С. 55–67.
4. Недоступ А. А. Физическое моделирование орудий и процессов рыболовства: моногр. Калининград: Изд-во КГТУ, 2012. 375 с.
5. Герман Б. И., Фридман А. Л., Ютик В. Е. Критерии изгибной жесткости сетчестых материалов при моделировании орудий лова // Сб. тр. каф. промышл. рыболовства. Калининград, 1977. Вып. 65. С. 64–69.
6. Стрекалова В. Н., Фридман А. Л. О моделировании упругости канатов в динамических рыболовных системах // Сб. тр. каф. промышл. рыболовства. Калининград, 1977. Вып. 65. С. 59–63.
7. Герман Б. И. Влияние жесткости сетного полотна на форму рыболовной сети в потоке // Сб. тр. каф. промышл. рыболовства. Калининград, 1977. Вып. 62. С. 116–120.

8. Стрекалова В. Н. Жесткость системы при задеве трала // Сб. тр. каф. промышл. рыболовства. Калининград, 1969. Вып. XXI. С. 163–168.
9. 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.
10. Фабрика шнуров «AAA ТЕКС». URL: [http://shnury.ru/catalog/kronnie\\_ropes\\_ropelay](http://shnury.ru/catalog/kronnie_ropes_ropelay) (дата обращения: 11.10.2019).

Статья поступила в редакцию 13.01.2020

### 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; progacpp@live.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.



## SUBSTANTIATION OF SIMILITUDE RULES OF BENDING STIFFNESS OF TWISTED FISHING GEAR

*A. A. Nedostup, K. V. Konvalova, P. V. Nasenkov, A. O. Razhev, S. V. Fedorov*

*Kaliningrad State Technical University,  
Kaliningrad, Russian Federation*

**Abstract.** The article considers the problems of physical modeling of twisted filamentary parts of fishing gear and the similitude rules of bending stiffness of filamentary gear parts (FP). The problems are caused firstly by the scope, high costs and complexity of engineering structures in commercial fishery, and thus it was impossible to use them in full-scale testing. Secondly, the lack of systematic experiments prevented from measuring the bending stiffness of synthetic rope parts of fishing gear (SRP). Thus, it becomes necessary to conduct model experiments related to physical modeling of dynamic processes occurring in twisted fishing gear, as well as to carry out a detailed study of the theory of similarity. An attempt to evaluate the bending stiffness of a full-scale object made of polyamide (diameter = 10 mm, the object length and pin diameter were found using large-scale physical characteristics) based on the analysis of experimental data on bending stiffness of synthetic filamentous gear parts made of polyamide with different diameter and length (length = 0.08; 0.10; 0.12; 0.16; 0.20, 0.24 m and diameter = 1.10; 2.0; 3.10; 4.0; 5.0, 6.0 mm) defined on the pins with diameter = 2.0, 10.0 and 30.0 mm. The obtained data will help to prove the correctness of using the theory of dynamic similarity in the course of justification of similarity rules of bending stiffness of the large-diameter cordage and to determine the basic physical and mechanical properties necessary for modeling industrial fishing gear.

**Key words:** industrial fishing gear, filamentary products, physical and mechanical properties, physical modeling, similarity rules, bending stiffness, cordage, diameter, polyamide.

**For citation:** Nedostup A. A., Konovalova K. V., Nasenkov P. V., Razhev A. O., Fedorov S. V. Substantiation of similitude rules of bending stiffness of twisted fishing gear. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing Industry*. 2020;1:77-85. (In Russ.) DOI: 10.24143/2073-5529-2020-1-77-85.

*REFERENCES*

1. Baranov F. I. Modelirovanie rybolovnykh orudii [Fishing gear modeling]. *Rybnoe khoziaistvo*, 1940, no. 5, pp. 32-33.
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. Nedostup A. A. Fizicheskoe modelirovanie gidrodinamicheskikh protsessov dvizheniia orudii rybolovstva [Physical modeling of hydrodynamic processes of moving parts of fishing gear]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika*, 2012, no. 3 (19), pp. 55-67.
4. Nedostup A. A. *Fizicheskoe modelirovanie orudii i protsessov rybolovstva: monografiia* [Physical modeling of fishing gear and fishing processes: monograph]. Kaliningrad, Izd-vo KGTU, 2012. 375 p.
5. German B. I., Fridman A. L., Iupik V. E. Kriterii izgibnoi zhestkosti setesnastnykh materialov pri modelirovanii orudii lova [Criteria of bending stiffness of cordage when modeling fishing gear]. *Sbornik trudov kafedry promyshlennogo rybolovstva*. Kaliningrad, 1977. Iss. 65. Pp. 64-69.
6. Strekalova V. N., Fridman A. L. O modelirovanii uprugosti kanatov v dinamicheskikh rybolovnykh sistemakh [Modeling elasticity of ropes in dynamic fishing systems]. *Sbornik trudov kafedry promyshlennogo rybolovstva*. Kaliningrad, 1977. Iss. 65. Pp. 59-63.
7. German B. I. Vliianie zhestkosti setnogo polotna na formu rybolovnoi seti v potoke [Influence of net fabric rigidity on shape of fishing net in the stream]. *Sbornik trudov kafedry promyshlennogo rybolovstva*. Kaliningrad, 1977. Iss. 62. Pp. 116-120.
8. Strekalova V. N. Zhestkost' sistemy pri zadeve trala [Rigidity of fishing system when hitting trawl]. *Sbornik trudov kafedry promyshlennogo rybolovstva*. Kaliningrad, 1969. Iss. XXI. Pp. 163-168.
9. Chaiun I. M., Nepomniashchii A. V., Chaiun M. I. Sviaz' izgibnoi zhestkosti pod"emnogo kabel'-kanata s ego deformirovanno-napriazhennym sostoianiem [Relation between bending stiffness of lifting cable and its deformed-stressed state]. *Hebezeuge und Fördermittel*, 2016, no. 2 (50), pp. 42-55.
10. *Fabrika shnurov «AAA TEKS»* [AAA TEX cord factory]. Available at: [http://shnury.ru/catalog/kronnie\\_ropes\\_ope\\_lay](http://shnury.ru/catalog/kronnie_ropes_ope_lay) (accessed: 11.10.2019).

The article submitted to the editors 13.01.2020

*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; Master's 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.

**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.

