Научные труды Дальрыбвтуза. 2026. Том 77, № 3. С. 194–201.

РЫБНОЕ ХОЗЯЙСТВО, АКВАКУЛЬТУРА И ПРОМЫШЛЕННОЕ РЫБОЛОВСТВО

Научная статья
УДК 639.2/.3:51-7; 639.2/.3:007 DOI: doi.org/10.48612/dalrybvtuz/2026-77-17 EDN: TGLUPW

# Физическое и математическое моделирование сетных инженерных конструкций с учетом внешних факторов воздействия

**Александр Алексеевич Недоступ [1], Карина Витальевна Коновалова [2], Павел Владимирович Насенков [3], Алексей Олегович Ражев [4]**

Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия
[1] nedostup@klgtu.ru, ORCID: 0000-0002-3851-0984
[2] karina.konovalova@klgtu.ru, ORCID: 0009-0009-9679-3247
[3] pavel.nasenkov@klgtu.ru, ORCID: 0000-0002-8841-1562
[4] aleksej.razhev@klgtu.ru, ORCID: 0000-0002-0983-834X

**Аннотация.** В статье приводятся результаты физического и математического моделирования сетных инженерных конструкций с учетом внешних факторов воздействия. Физическое моделирование сетных конструкций, имитирующих траловые мешки, основано на теории мультифизического подобия Недоступа А. А., базой которой является обоснование и вывод критериев подобия с учетом линейного масштаба $C_l$. Экспериментальные исследования с сетными инженерными конструкциями проводились в гидроканале ООО «Фишеринг Сервис». Конструктивные параметры шести сетных конструкций в виде траловых мешков варьировались в диапазонах: длина $3{,}4 \le L \le 5{,}1$ м; диаметр обруча $0{,}35 \le D_{об} \le 0{,}64$ м; диаметр шнура $d$=3,1 мм; шаг ячеи $60 \le a \le 100$ мм; ориентация ячеи Т0 и Т90. Скорость потока воды в гидроканале составляла $1{,}0 \le v \le 2{,}5$ м/с, числа Рейнольдца $1{,}938 \times 10^3 \le \mathrm{Re} \le 4{,}844 \times 10^3$. В ходе экспериментов измерялось гидродинамическое сопротивление сетной инженерной конструкции $R_x$. Имитацией внешнего воздействия на сетную инженерную конструкцию составляли пластиковые шары, диаметром $D_ш$=45 мм с нейтральной плавучестью. Математическое моделирование сетных инженерных конструкций выполнялось на основании программного обеспечения, разработанного авторами статьи.

**Ключевые слова:** физическое моделирование, математическое моделирование, гидромеханика, Т0, Т90, сетная конструкция, траловый мешок

**Финансирование:** исследование выполнено в ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» за счет гранта Российского научного фонда № 25-21-00008 «Физическое, математическое и компьютерное моделирование сетных инженерных конструкций с учетом внешних факторов воздействия», https://rscf.ru/project/25-21-00008/.

**Для цитирования:** Недоступ А. А., Коновалова К. В., Насенков П. В., Ражев А. О. Физическое и математическое моделирование сетных инженерных конструкций с учетом внешних факторов воздействия // Научные труды Дальрыбвтуза. 2026. Т. 77, № 3. С. 194–201.

© Недоступ А. А., Коновалова К. В., Насенков П. В., Ражев А. О., 2026

**Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University. 2026. Vol. 77, no. 3. P. 194–201.**

FISHERIES, AQUACULTURE AND INDUSTRIAL FISHERIES

**Original article**

# Physical and mathematical modeling of grid engineering structures taking into account external factors of influence

**Aleksandr A. Nedostup [1], Karina V. Konovalova [2], Pavel V. Nasenkov [3], Aleksej O. Razhev [4]**
Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia
[1] nedostup@klgtu.ru, ORCID: 0000-0002-3851-0984
[2] karina.konovalova@klgtu.ru, ORCID: 0009-0009-9679-3247
[3] pavel.nasenkov@klgtu.ru, ORCID: 0000-0002-8841-1562
[4] aleksej.razhev@klgtu.ru, ORCID: 0000-0002-0983-834X

**Abstract.** The article presents the results of physical and mathematical modeling of grid engineering structures, taking into account external factors of influence. The physical modeling of net structures simulating trawl bags is based on the theory of A.A. Nedostup multiphysical similarity, which is based on the substantiation and derivation of similarity criteria taking into account the linear scale of $C_l$. Experimental studies with grid engineering structures were carried out in the hydrochannel of LLC "Fishering Service". The design parameters of the six net structures in the form of trawl bags varied in the ranges: length $3{,}4 \le L \le 5{,}1$ m; hoop diameter $0{,}35 \le D_h \le 0{,}64$ m; cord diameter $d$=3,1 mm; mesh pitch $60 \le a \le 100$ mm; mesh orientation T0 and T90. The water flow rate in the hydraulic channel was $1{,}0 \le v \le 2{,}5$ m/s, and the Reynolds numbers were $1{,}938 \times 10^3 \le \mathrm{Re} \le 4{,}844 \times 10^3$. During the experiments, the hydrodynamic resistance $R_x$ of the grid engineering structure was measured. Plastic balls with a diameter of $D_b$ = 45 mm with neutral buoyancy were used to simulate the external impact on the grid engineering structure. Mathematical modeling of grid engineering structures was performed on the basis of software developed by the authors of the article.

**Keywords:** physical modeling, mathematical modeling, hydromechanics, T0, T90, net construction, trawl bag

**Funding:** the research was carried out at the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kaliningrad State Technical University" under the grant of the Russian Science Foundation, No. 25-21-00008 «Physical, mathematical and computer modeling of grid engineering structures taking into account external factors of influence», https://rscf.ru/project/25-21-00008/.

**For citation:** Nedostup A. A., Konovalova K. V., Nasenkov P. V., Razhev A. O. Physical and mathematical modeling of grid engineering structures taking into account external factors of influence. *Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University.* 2026; 77(3):194–201. (In Russ.).

## Введение

Сетные инженерные конструкции применяются в широких областях производственной деятельности человека, это рыболовство, рыбоводство, транспорт, промышленная сфера. Исследование гидромеханики сетной конструкции представляет собой сложную задачу, связанную с определением ее формы и сопротивления под влиянием жесткости, гидроподпора, коллизий, возникающих при столкновении объектов.

Физическое и математическое моделирование сетных инженерных конструкций с учетом внешних факторов воздействия является важной задачей для определения ее формы и сопротивления.

Физическое моделирование сетных конструкций, имитирующих траловые мешки, основано на теории мультифизического подобия Недоступа А. А., базой которой является обоснование и вывод критериев подобия с учетом линейного масштаба $C_l$. В табл. 1 приводятся основные масштабы подобия механических, гидродинамических, грунтодинамических и трибологических величин сетных инженерных конструкций.

Таблица 1

**Основные масштабы подобия механических, гидродинамических, грунтодинамических и трибологических величин**

Table 1

**Basic scales of similarity of mechanical, hydrodynamic, soil-dynamic and tribological quantities**

| Масштабы физических характеристик | | Преобразование через масштаб $C_l$ |
|---|---|---|
| Физические характеристики | Обозначение | |
| Геометрический параметр (длина, высота, ширина и др.) | $C_l$ | $C_l$ |
| Геометрический параметр (площадь) | $C_F$ | $C_l^2$ |
| Геометрический параметр (объем) | $C_V$ | $C_l^3$ |
| Геометрический параметр (геометрический момент инерции) | $C_I$ | $C_l^4$ |
| Масса | $C_m$ | $C_l^3$ |
| Время | $C_t$ | $C_l^{5/4}$ |
| 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 воды | $C_\rho$ | 1 |
| Динамическая вязкость воды | $C_\mu$ | $C_l^{3/4}$ |
| Кинематическая вязкость воды | $C_\upsilon$ | $C_l^{3/4}$ |
| Изгибная жесткость | $C_{EI}$ | $C_l^{7/2}$ |
| Упругость материала | $C_E$ | $C_l^{-1/2}$ |
| Давление | $C_p$ | $C_l^{-1/2}$ |
| Частота колебаний | $C_f$ | $C_l^{-5/4}$ |
| Касательное напряжение | $C_\sigma$ | $C_l^{-1/2}$ |
| Потенциальная энергия | $C_{Un}$ | $C_l^{5/2}$ |
| Кинематическая энергия | $C_{Tn}$ | $C_l^{5/2}$ |
| Поверхностное натяжение | $C_{\sigma n}$ | $C_l^{1/2}$ |
| Нормальная нагрузка | $C_{\sigma гр}$ | $C_l^{-1/2}$ |
| Угол | $C_\alpha=C_{\varphi вн}$ | 1 |
| Сплошность | $C_{Fo}$ | 1 |
| Коэффициент сопротивления (распорной силы, боковой силы) | $C_k$ | 1 |
| Коэффициент трения | $C_{\mu d}$ | 1 |
| Относительное удлинение | $C_\varepsilon$ | 1 |

Математическое моделирование сетных инженерных конструкций выполнялось на основании программного обеспечения, разработанного авторами статьи (рис. 1).

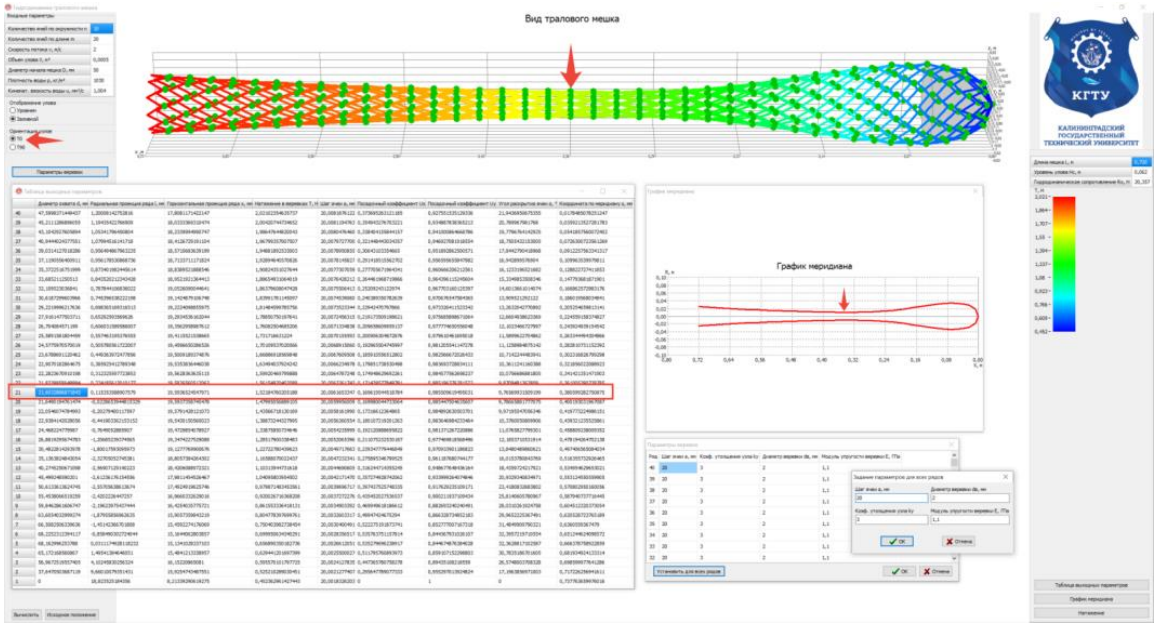



Рис. 1. Главное окно компьютерной программы «Гидродинамика тралового мешка». Составлено авторами

Fig. 1. The main window of the computer program "Hydrodynamics of the trawl bag". Compiled by the authors

## Постановка задачи

Экспериментальные исследования с сетными инженерными конструкциями проводились в гидроканале ООО «Фишеринг Сервис» (рис. 2). Конструктивные параметры шести сетных конструкций в виде траловых мешков варьировались в диапазонах: длина $3{,}4 \le L \le 5{,}1$ м.; диаметр обруча $0{,}35 \le D_{об} \le 0{,}64$ м.; диаметр шнура $d$=3,1 мм; шаг ячеи $60 \le a \le 100$ мм; ориентация ячеи Т0 и Т90. Обручи изготовлены из алюминия и закреплены в начале сетной инженерной конструкции для поддержания заданного раскрытия. Конструктивные характеристики траловых мешков приводятся в табл. 2.




Рис. 2. Экспериментальные исследования гидроканале ООО «Фишеринг Сервис». Фото авторов

Fig. 2. Experimental studies in the flume tank of Fishering Service LLC. Photo taken by the authors

Таблица 2

**Конструктивные характеристики траловых мешков**

Table 2

**Design characteristics of trawl bags**

| Траловый мешок | Диаметр шнура $d$, мм | Шаг ячеи $a$, мм | Ориентация ячеи | Кол-во ячей по ширине $n$, яч | Кол-во ячей по длине $m$, яч | Площадь шнуров $F_н$, м$^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 3,1 | 60 | Т0 | 50 | 40 | 1,49 |
| 2 | 3,1 | 80 | Т0 | 38 | 30 | 1,13 |
| 3 | 3,1 | 100 | Т0 | 30 | 24 | 0,89 |
| 4 | 3,1 | 60 | Т90 | 50 | 40 | 1,49 |
| 5 | 3,1 | 80 | Т90 | 38 | 30 | 1,13 |
| 6 | 3,1 | 100 | Т90 | 30 | 24 | 0,89 |

## Материалы и методы

Скорость потока воды в гидроканале составляла $1{,}0 \le v \le 2{,}5$ м/с, числа Рейнольдца $1{,}938\times10^3 \le Re \le 4{,}844\times10^3$ при коэффициенте кинематической вязкости воды в гидроканале $\upsilon = 1{,}6\times10^{-6}$ м$^2$/с. В ходе экспериментов измерялось гидродинамическое сопротивление сетной инженерной конструкции вместе с обручем, а также гидродинамическое сопротивление самих обручей для дальнейшего вычета из расчетов. В табл. 3 представлены данные гидродинамического сопротивления инженерной конструкции $R_x$ без учета обручей.

Таблица 3

**Гидродинамическое сопротивление инженерной конструкции**

Table 3

**Hydrodynamic resistance of the engineering structure**

| Ориентация ячеи | Шаг ячеи $a$, мм | Диаметр обруча $D_{об}$, м | Скорость потока $v$, м/с | Число Рейнольдца Re $\times10^3$ | Гидродинамическое сопротивление $R_x$, Н |
|---|---|---|---|---|---|
| Т0 | 60 | 0,35 | 1,0 | 1,938 | 14 |
| | | | 1,8 | 3,487 | 72 |
| | | | 2,5 | 4,844 | 149 |
| | | 0,54 | 1,0 | 1,938 | 29 |
| | | | 1,8 | 3,487 | 127 |
| | | | 2,5 | 4,844 | 251 |
| | | 0,64 | 1,0 | 1,938 | 39 |
| | | | 1,8 | 3,487 | 152 |
| | | | 2,5 | 4,844 | 303 |
| | 80 | 0,35 | 1,0 | 1,938 | 13 |
| | | | 1,8 | 3,487 | 69 |
| | | | 2,5 | 4,844 | 142 |
| | | 0,54 | 1,0 | 1,938 | 30 |
| | | | 1,8 | 3,487 | 123 |
| | | | 2,5 | 4,844 | 261 |
| | | 0,64 | 1,0 | 1,938 | 38 |
| | | | 1,8 | 3,487 | 124 |
| | | | 2,5 | 4,844 | 273 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 100 | 0,35 | 1,0 | 1,938 | 2 |
| | | | 1,8 | 3,487 | 30 |
| | | | 2,5 | 4,844 | 65 |
| | | 0,54 | 1,0 | 1,938 | 18 |
| | | | 1,8 | 3,487 | 55 |
| | | | 2,5 | 4,844 | 126 |
| | | 0,64 | 1,0 | 1,938 | 33 |
| | | | 1,8 | 3,487 | 76 |
| | | | 2,5 | 4,844 | 146 |
| Т90 | 60 | 0,35 | 1,0 | 1,938 | 109 |
| | | | 1,8 | 3,487 | 295 |
| | | | 2,5 | 4,844 | 519 |
| | | 0,54 | 1,0 | 1,938 | 129 |
| | | | 1,8 | 3,487 | 355 |
| | | | 2,5 | 4,844 | 632 |
| | | 0,64 | 1,0 | 1,938 | 114 |
| | | | 1,8 | 3,487 | 357 |
| | | | 2,5 | 4,844 | 654 |
| | 80 | 0,35 | 1,0 | 1,938 | 61 |
| | | | 1,8 | 3,487 | 193 |
| | | | 2,5 | 4,844 | 342 |
| | | 0,54 | 1,0 | 1,938 | 89 |
| | | | 1,8 | 3,487 | 254 |
| | | | 2,5 | 4,844 | 462 |
| | | 0,64 | 1,0 | 1,938 | 90 |
| | | | 1,8 | 3,487 | 267 |
| | | | 2,5 | 4,844 | 513 |
| | 100 | 0,35 | 1,0 | 1,938 | 33 |
| | | | 1,8 | 3,487 | 113 |
| | | | 2,5 | 4,844 | 200 |
| | | 0,54 | 1,0 | 1,938 | 51 |
| | | | 1,8 | 3,487 | 154 |
| | | | 2,5 | 4,844 | 293 |
| | | 0,64 | 1,0 | 1,938 | 53 |
| | | | 1,8 | 3,487 | 172 |
| | | | 2,5 | 4,844 | 294 |

На рис. 3–4 представлен график значений зависимостей Re=$f(c_x)$ для траловых мешков Т0 и Т90 с шагом ячеи 60 мм.

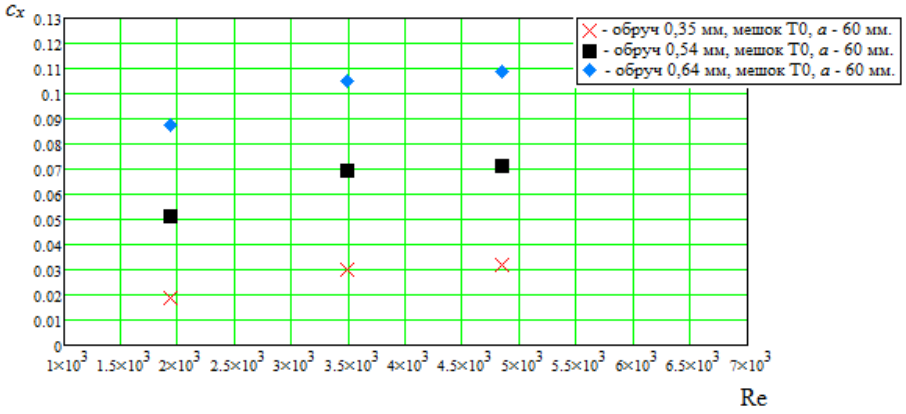



Рис. 3. График значений зависимости Re=f($c_x$) для тралового мешка Т0 с шагом ячеи 60 мм.
Составлено авторами
Fig. 3. Graph of the values of the dependence Re=f($c_x$) for a trawl bag T0 with a mesh mesh of 60 mm.
Compiled by the authors

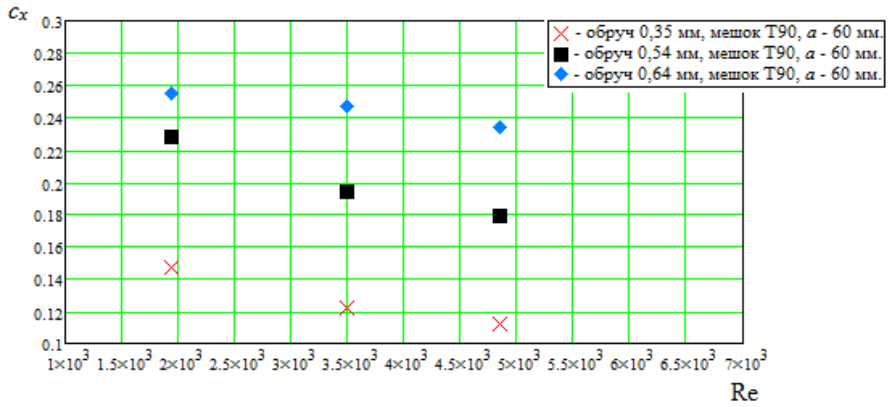



Рис. 4. График значений зависимости Re=f($c_x$) для тралового мешка Т90 с шагом ячеи 60 мм.
Составлено авторами
Fig. 4. Graph of the values of the dependence Re=f($c_x$) for a trawl bag T90 with a mesh mesh of 60 mm.
Compiled by the authors

## Заключение

По предложенной математической модели авторами была разработана программа для ЭВМ «Гидродинамика тралового мешка», позволяющая рассчитать форму мешка и нагрузки в его элементах при различных конструктивных параметрах элементов тралового мешка, скорости траления, ориентации ячей, с последующей их визуализацией в трехмерном, двухмерном и числовом представлениях. Область применения разработанной программы: научные исследования, учебный процесс, проектирование и эксплуатация рыболовных тралов.

## Список источников

1. Digre, H., Hansen, U.J. & Erikson, U. Effect of trawling with traditional and ‘T90’ trawl codends on fish size and on different quality parameters of cod Gadus morhua and haddock Melanogrammus aeglefinus . Fish Sci 76, 549–559 (2010).

2. Ражев, А. О. Механика сетных орудий внутреннего и прибрежного рыболовства : специальность 05.18.17 «Промышленное рыболовство» : дис. … канд. техн. наук / Ражев Алексей Олегович, 2020. 201 с.

3. Недоступ А. А. Методы расчета сетных пассивных орудий внутреннего и прибрежного рыболовства / А. А. Недоступ. Калининград : Калининградский государственный технический университет, 2010. 281 с. ISBN 978-5-94826-291-8.

4. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / под ред. М. О. Штейберга. 4-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1992. 672 с. ISBN 5-217-00423-8.

5. Hoerner, S. F. Fluid-Dynamic Drag: Practical Information on Aerodynamic Drag and Hydrodynamic Resistance, Bricktownship, NJ. 1965. 455 p.

6. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М. : Наука, 1978. 832 с.

## Сведения об авторах

А. А. Недоступ – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой промышленного рыболовства, AuthorID: 393895.

К. В. Коновалова – кандидат технических наук, ведущий инженер кафедры промышленного рыболовства, AuthorID: 1145543.

П. В. Насенков – кандидат технических наук, заведующий лабораториями кафедры промышленного рыболовства, AuthorID: 1102950.

А. О. Ражев – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, AuthorID: 723215.

## Information about the authors

A. A. Nedostup – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Commercial Fisheries, AuthorID: 393895.

K. V. Konovalova – PhD in Technical Sciences, Leading Engineer of the Department of Commercial Fisheries, AuthorID: 1145543.

P. V. Nasenkov – PhD in Technical Sciences, Head of Laboratories, Department of Commercial Fisheries, AuthorID: 1102950.

A. O. Razhev – PhD in Technical Sciences, Leading Research Fellow, AuthorID: 723215.

Статья поступила в редакцию 19.08.2026; одобрена после рецензирования 03.09.2026; принята к публикации 10.09.2026.

The article was submitted 19.08.2026; approved after reviewing 03.09.2026; accepted for publication 10.09.2026.

© Недоступ А. А., Коновалова К. В., Насенков П. В., Ражев А. О., 2026.

«Физическое и математическое моделирование сетных инженерных конструкций с учетом внешних факторов воздействия» [Недоступ А. А., Коновалова К. В., Насенков П. В., Ражев А. О.] распространяется под лицензией Creative Commons Attribution (CC BY 4.0).