

## Гидродинамика сетных жестких безузловых конструкций

DOI: 10.37663/0131-6184-2023-3-

**Недоступ Александр Алексеевич** – канд. техн. наук, доцент заведующий кафедрой промышленного рыболовства, @ nedostup@klgtu.ru;

**Ражев Алексей Олегович** – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, @ aleksej.razhev@klgtu.ru;

**Насенков Павел Владимирович** – младший научный сотрудник, @ pavel.nasenkov@klgtu.ru;

**Сергеев Егор Ильич** – аспирант кафедры промышленного рыболовства, @ rygojaeger@gmail.com

**Белозер Иван Сергеевич** – магистрант кафедры промышленного рыболовства, @ belozer2001@gmail.com – Калининградского государственного технического университета (ФГБОУ ВО «КГТУ»)

**Адрес:** 236022, Россия г. Калининград, Советский проспект, д. 1

### Аннотация.

Сетные жесткие конструкции представляют собой элементы, детали орудий промышленного рыболовства и садков аквакультуры. Они служат с целью заграждения или фильтрации гидробионтов, представляют собой инженерные сооружения. Сетные жесткие конструкции могут быть как вставками в орудиях промышленного рыболовства, также представляют собой селективные решетки и элементы, предотвращающие гидроподпор в тралах. Также являются элементами стационарных орудий рыболовства, таких как вентера или другие орудия рыболовства или заграждения. В садках аквакультуры сетные жесткие конструкции, элементы которых имеют достаточно большое значение продольного и поперечного модулей упругости  $E$ , представляют собой детали, обеспечивающие прочность сетных конструкций. Сетные жесткие конструкции выполняются из пластиковых или алюминиевых стержней в виде цилиндров, которые могут быть как гладкими, так и крученными. В статье рассмотрено применение численного метода для определения гидродинамических характеристик сетных жестких конструкций при помощи разработанного авторами программного обеспечения. Предложены схематизация сетной жесткой конструкции, математическая модель, основанная на дифференциальных уравнениях в частных производных Навье-Стокса, расчетная область, начальные и граничные условия. Расчет проводился на регулярной расчетной сетке по неявной конечно-разностной схеме с применением методов покоординатного расщепления, линеаризации нелинейных уравнений с последующей коррекцией нелинейных коэффициентов, решением полученных трехдиагональных систем методом прогонки. Приводятся результаты численных экспериментов в виде визуализации давления на поверхности различных сетчатых конструкций при различных углах атаки.

### Ключевые слова:

сетная жесткая конструкция, программное обеспечение, гидродинамика, цифровые технологии

### Для цитирования:

Недоступ А.А., Ражев А.О., Насенков П.В., Сергеев Е.И., Белозер И.С. Гидродинамика сетных жестких безузловых конструкций // Рыбное хозяйство. 2023. № 3. С. DOI: 10.37663/0131-6184-2023-3-

## HYDRODYNAMICS OF NETTING RIGID KNOTLESS STRUCTURES

**Alexander A. Nedostup** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
Head of the Department of Industrial Fisheries, @ nedostup@klgtu.ru;

**Alexey O. Razhev** – Candidate of Technical Sciences, Leading researcher, @ aleksej.razhev@klgtu.ru;

**Pavel V. Nasenkov** – junior researcher, pavel.nasenkov@klgtu.ru;

**Egor I. Sergeev** – graduate student of the Department of Industrial Fisheries, @ pyrojaeger@gmail.com;

**Ivan S. Belozer** – Master's student of the Department of Industrial Fisheries, @ belozer2001@gmail.com –  
*Kaliningrad State Technical University (KSTU)*  
Address: 1 Sovetsky Prospekt, Kaliningrad, 236022, Russia

**Abstract.** Rigid netting structures are elements, parts of commercial fishing gear and aquaculture cages. They serve to enclose or filter hydrobionts, they are engineering structures. Rigid netting structures can be used as inserts in commercial fishing gear, as well as selective gratings and elements that prevent hydraulic backwater in trawls. They are also elements of stationary fishing gear, such as winders or other fishing gear or barriers. In aquaculture cages, rigid netting structures, the elements of which have a sufficiently large value of the longitudinal and transverse modulus of elasticity  $E$ , are parts that ensure the strength of the netting structures. Mesh rigid structures are made of plastic or aluminum rods in the form of cylinders, which can be either smooth or twisted. The article considers the application of a numerical method for determining the hydrodynamic characteristics of mesh rigid structures using the software developed by the authors. A schematization of a rigid netting structure, a mathematical model based on Navier-Stokes partial differential equations, a computational domain, initial and boundary conditions are proposed. The calculation was carried out on a regular computational grid using an implicit finite-difference scheme using the methods of coordinate-wise splitting, linearization of nonlinear equations with subsequent correction of nonlinear coefficients, and solution of the obtained tridiagonal systems by the sweep method. The results of numerical experiments are presented in the form of visualization of pressure on the surface of various mesh structures at various angles of attack.

**Keywords:**

netting rigid knotless structure, software, hydrodynamics, digital technologies

**Cite as:**

*Nedostup A.A., Razhev A.O., Nasenkov P.V., Sergeev E.I., Belozer I.S.* Hydrodynamics of Tight Rigid Nodeless Structures // Fisheries. 2023. No. 3. p. DOI: 10.37663/0131-6184-2023-3-

Сетные жесткие конструкции широко применяются в рыбохозяйственных комплексах многих стран: в орудиях промышленного рыболовства [1; 2], в садках аквакультуры [3-5]. Также применяются сетные жесткие конструкции в различных инженерных сооружениях [6-10]. Сетные конструкции представляют собой жесткие инженерные сооружения, при этом жесткость стержней может отличаться на порядки. При этом принято считать, что при малых числах модуля упругости (продольного и поперечного)  $E$  сетчатые конструкции называются сетными конструкциями.

В промышленном рыболовстве сетные жесткие конструкции применяются с целью заграждения или фильтрации гидробионтов, но также и облова. К примеру такие орудия промышленного рыболовства, как вентеры. В первом случае – это селективные устройства, которые сортируют промысловые размеры гидробионтов и прилов, уменьшают гидродопор в тралах, во втором случае – это стационарные орудия рыболовства, которые облавливают частичковые виды рыб.

Сетные жесткие конструкции, в виде продольных связей (прутьев или стержней), в промышленном рыболовстве рассматриваются как селективные решетки или сортирующие устройства [11-14]. На рисунке 1 изображена селективная решетка в трале для лова трески. На рисунке 2 изображен вентер.

Для определения гидродинамических характеристик, а это поля скоростей и давлений, сетных жестких конструкций, у которых продольный модуль упругости сопоставим с модулем упругости пластика, т.е. не менее  $E \leq 5$  ГПа, применяются различные методы:

- физический эксперимент [15; 16];
- численный эксперимент [17-19].

При этом в первом случае определить поле скоростей не представляется возможным без специальной измерительной аппаратуры, которая позволяет исследовать поля скоростей и давлений вблизи элементов сетных конструкций. Во втором случае это возможно, но следует иметь в виду, что применяемые алгоритмы численного эксперимента и имитационного моделирования, основанные на решении уравнения Навье-Стокса и уравнения неразрывности, сопряжено с большими трудностями [20; 21].

Рассмотрим схематизацию сетных конструкций без крутки элемента (см. рис. 3).

Численный эксперимент выполнялся в программном обеспечении «Гидродинамика сетных жестких конструкций», которое написано на языке C++ в среде разработки программного обеспечения Embarcadero RAD Studio и предназначено для работы в операционной системе Microsoft Windows 10. Программа представляет собой выполняемый EXE файл, запускаемый в операцион-

ной системе. Элементы интерфейса программы являются стандартными для операционной системы Windows и не требуют от пользователя дополнительных навыков и знаний. В компьютерной программе «Гидродинамика сетчатых конструкций» предусмотрен расчет сетчатых конструкций. На рисунке 4 изображена расчетная область и граничные условия.

Компьютерное моделирование сетных конструкций, с целью расчета полей скоростей и давлений, проводилось на разработанном авторами программном обеспечении. Расчет проводился на основе системы дифференциальных уравнений в частных производных Навье-Стокса (1) - (3), дополненной уравнением неразрывности (4), в которые было введено понятие искусственной сжимаемости среды (2):

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} = \nu \left( \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1)$$

$$\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} = \nu \left( \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (2)$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = \nu \left( \frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (3)$$

$$\alpha \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0, \quad (4)$$

где  $v_x, v_y, v_z$  – проекции скорости в узле расчетной сетки на оси координат в ортогональном базисе;  $\nu$  – кинематическая вязкость воды;  $p$  – давление (относительное) в узле расчетной сетки;  $\alpha$  – коэффициент искусственной сжимаемости среды;  $t$  – время.

Расчет проводился на регулярной расчетной сетке неявным конечно-разностным методом с ограничениями первого рода по полю скоростей на границах расчетной сетки  $v_\Gamma$  и на поверхности элементов сетчатой конструкции  $v_D$ , и с ограничениями первого рода по полю давлений на границах расчетной сетки  $p_\Gamma$

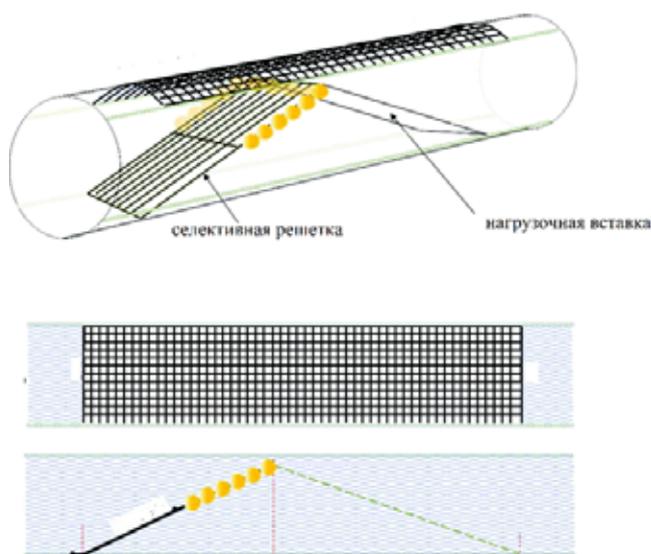
$$\begin{aligned} v_{\Gamma x} &= v; v_{\Gamma y} = 0; v_{\Gamma z} = 0 \\ v_{Dx} &= 0; v_{Dy} = 0; v_{Dz} = 0, \\ p_\Gamma &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

где  $v$  – скорость потока жидкости, ориентированного по направлению оси координат  $x$ .

Начальные значения поля скоростей и давлений:

$$\begin{aligned} v_x &= v; v_y = 0; v_z = 0 \\ p_\Gamma &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

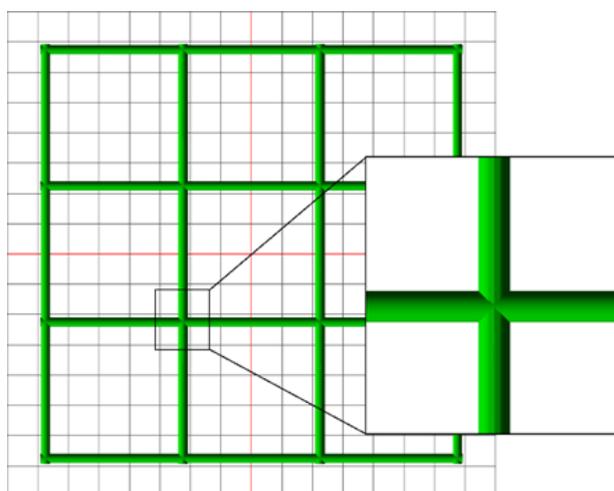
При расчете использовалось покоординатное расщепление уравнений (1) - (3) по базисным векторам с получением  $12n$  более простых уравнений, где  $n$  – количество узлов расчетной сетки, последующей линеаризацией нелинейных уравнений, выделением нелинейных коэффициентов и получением трехдиагональных систем линейных алгебраических уравнений. Для направления  $x$  получаем:



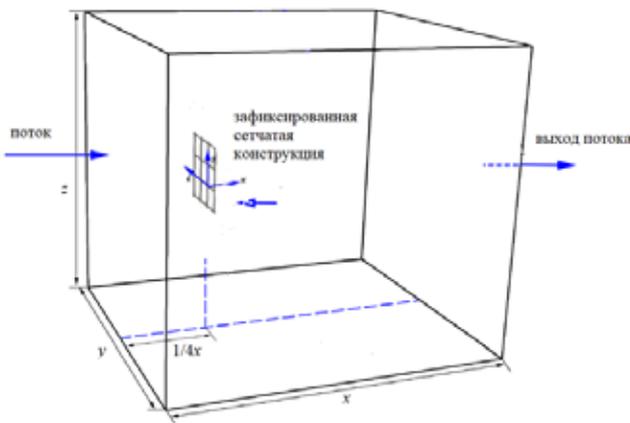
**Рисунок 1.** Селективная решетка в трале для лова трески  
**Figure 1.** Selective grating in a cod-end of trawl



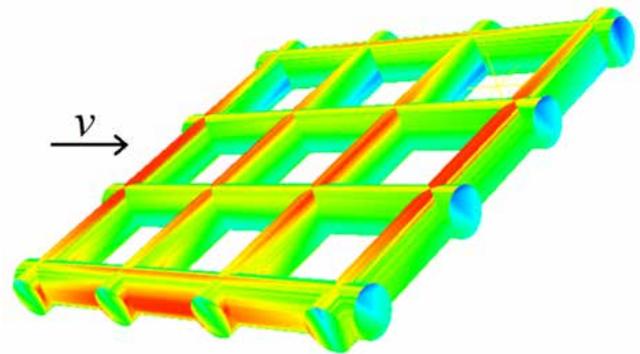
**Рисунок 2.** Вентерь  
**Figure 2.** Venter



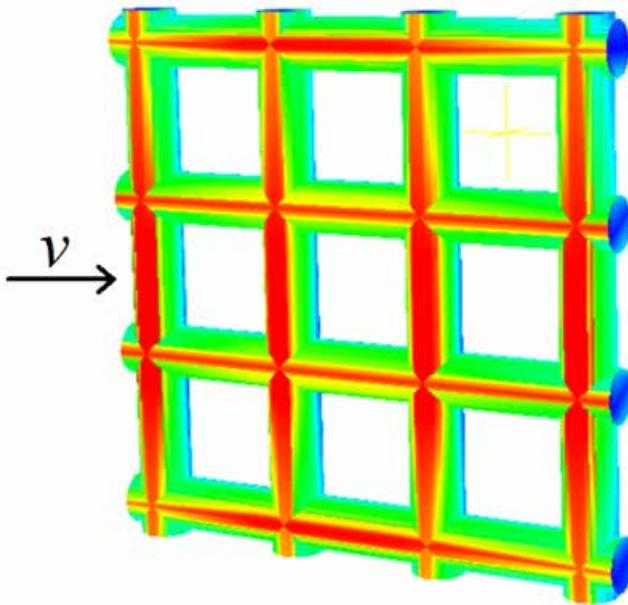
**Рисунок 3.** Схематизация сетных жестких безузловых конструкций  
**Figure 3.** Schematization of grid rigid knotless structures



**Рисунок 4.** Расчетная область и граничные условия  
**Figure 4.** Computational domain and boundary conditions



**Рисунок 6.** Компьютерное моделирование сетной жесткой конструкции с некрученными элементами: (сетка 9 ячеей, шаг ячеей 12,4 мм), вектор скорости потока расположен под углом 45°  
**Figure 6.** Computer simulation of a rigid mesh structure with untwisted elements: (grid 9 meshes, mesh pitch 12.4 mm), flow velocity vector located at an angle of 45°



**Рисунок 5.** Компьютерное моделирование сетной жесткой конструкции с некрученными элементами: (сетка 9 ячеей, шаг ячеей 12,4 мм), вектор скорости потока расположен под углом 90°  
**Figure 5.** Computer simulation of a rigid mesh structure with untwisted elements: (grid 9 mesh, mesh pitch 12.4 mm), flow velocity vector at angle of 90°

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} + \underline{v_x} \frac{\partial v_x}{\partial x} - v \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (7)$$

$$\underline{v_x} \frac{\partial v_y}{\partial x} - v \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} = 0 \quad (8)$$

$$\underline{v_x} \frac{\partial v_z}{\partial x} - v \frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\alpha}{3} \frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{\partial v_x}{\partial x} \quad (10)$$

Аналогично для направлений y и z. В (7) – (10) нижнем подчеркиком выделены нелинейные коэффициенты.

Для решения применялась следующая конечно-разностная аппроксимация частных производных:

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{v_{[i+1,j,k]} - v_{[i-1,j,k]}}{2\Delta x}, \quad (11)$$

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = \frac{v_{i+1,j,k} - 2v_{i,j,k} + v_{i-1,j,k}}{\Delta x^2}, \quad (12)$$

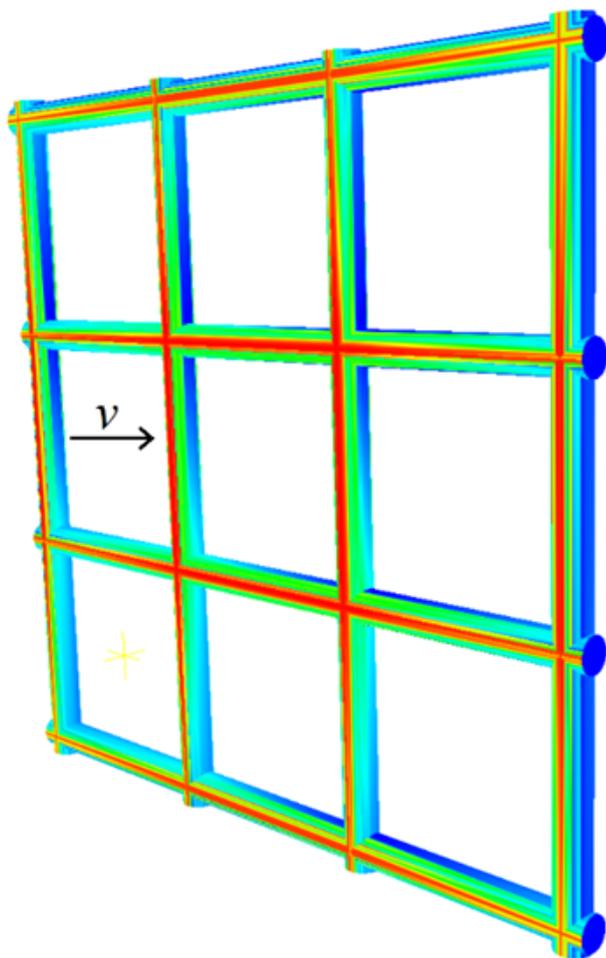
$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{v_{i,j,k} - v_{i-1,j,k}}{\Delta t}, \quad (13)$$

**Таблица 1.** Характеристики сетчатых безузловых конструкций ПС / **Table 1.** Characteristics of mesh nodeless structures of PS

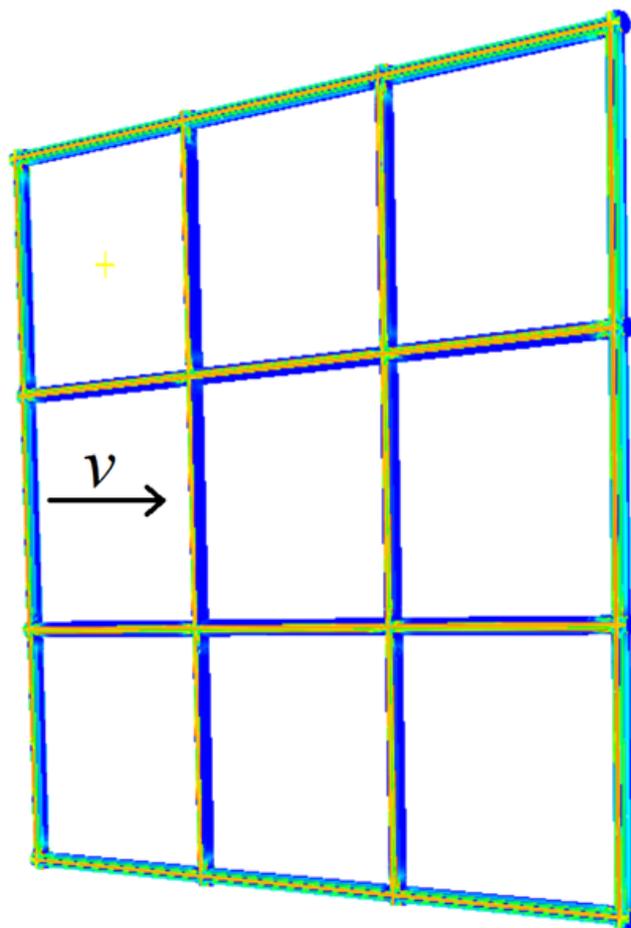
Тип элемента	Модуль упругости при изгибе E, ГПа	Диаметр цилиндра d мм	Шаг ячеей (длина цилиндра) a, мм	Отношение d/a
Гладкий цилиндр	2,7	3,1	12,4	1/4
			24,8	1/8
			49,6	1/16

**Таблица 2.** Характеристики потока / **Table 2.** Flow characteristics

Жидкость	Плотность ρ, кг/м³	Коэффициент кинематической вязкости ν, м²/с	Скорость потока по оси OX v, м/с	Температура потока T, °C
вода	1000	1,3 · 10 <sup>-6</sup>	1,0	18



**Рисунок 7.** Компьютерное моделирование сетчатой конструкции с некрученными элементами: (сетка 9 ячеей, шаг ячеей 24,8 мм), вектор скорости потока расположен под углом 90°  
**Figure 7.** Computer simulation of a mesh structure with untwisted elements: (mesh 9 mesh, mesh pitch 24.8 mm), the flow velocity vector is located at an angle of 90°



**Рисунок 8.** Компьютерное моделирование сетчатой конструкции с некрученными элементами: (сетка 9 ячеей, шаг ячеей 49,6 мм), вектор скорости потока расположен под углом 90°  
**Figure 8.** Computer simulation of a mesh structure with untwisted elements: (mesh 9 mesh, mesh pitch 49.6 mm), the flow velocity vector is located at an angle of 90°

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{P_{i,j,k} - P_{i-1,j,k}}{\Delta t}, \quad (14)$$

где  $v$  – вектор скорости в узле расчетной сетки;  $i, j, k$  – индексы узлов расчетной сетки.

Алгоритм расчета во внутреннем цикле каждого временного слоя решает систему линейных уравнений методом прогонки, во внешнем – производит коррекцию нелинейных коэффициентов.

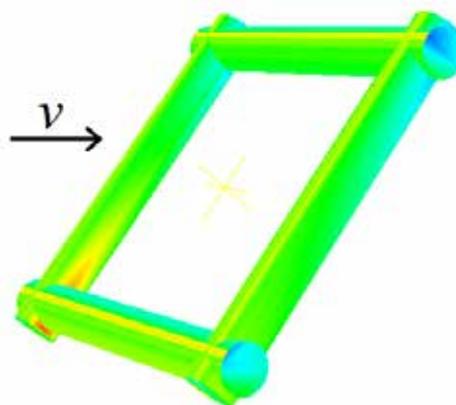
Коэффициент искусственной сжимаемости среды  $\alpha$  вводится с целью добавления системы уравнений с неизвестным давлением, связывающей давление со скоростью.

Условие завершения итерационного процесса на каждом временном слое либо полного завершения, в случае стационарного течения

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \rightarrow 0 \quad (15)$$

с заданной расчетной погрешностью.

В таблице 1 приводятся характеристики сетных жестких, безузловых конструкций, изготовленных из полистирола (ПС).



**Рисунок 9.** Компьютерное моделирование элементарной ячейки с некрученными элементами: (сетка 1 ячеей, шаг ячеей 24,8 мм), вектор скорости потока расположен под углом 45°  
**Figure 9.** Computer simulation of a unit cell with untwisted elements: (mesh 1 mesh, mesh pitch 24.8 mm), flow velocity vector located at an angle of 45°

В таблице 2 приводятся характеристики потока.

На рисунке 5 изображены результаты компьютерного моделирования сетной жесткой безузловой конструкции при условии, что вектор скорости потока в перпендикулярен плоскости ячеи сетчатой конструкции.

На рисунке 6 изображены результаты компьютерного моделирования сетной жесткой конструкции при условии, что вектор скорости потока в расположен под углом  $45^\circ$  (угол атаки) к плоскости ячеи сетной конструкции.

На рисунках 6-8 изображены результаты компьютерного моделирования сетной жесткой безузловой конструкции с некрученными элементами при условии, что вектор скорости потока в расположен под углом  $90^\circ$  (угол атаки) к плоскости ячеи сет.

Экспериментальные исследования хорошо согласуются с опытными данными, которые проводили ученых из различных стран [22-42].

*Исследование выполнено в рамках выполнения государственного задания по теме «Разработка физических, математических и предсказательных моделей процессов эксплуатации донного и разноглубинного траловых комплексов».*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

*Вклад в работу авторов: А.А. Недоступ – идея работы, окончательная проверка статьи; А.О. Ражев – идея работы, сбор и анализ данных; П.В. Насенков – сбор и анализ данных, подготовка статьи; Е.И. Сергеев – подготовка 3D моделей; И.С. Белозер – сбор и анализ данных.*

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

*Contribution to the work of the authors: A.A. Nedostup – the idea of the work, the final verification of the article; A.O. Razhev – the idea of the work, data collection and analysis; P.V. Nassenkov – data collection and analysis, preparation of the article; E.I. Sergeev – preparation of 3D models; I.S. Belozher – data collection and analysis.*

## ЛИТЕРАТУРА И ИСТОЧНИКИ

1. Недоступ А.А., Ражев А.О. Моделирование орудий и процессов рыболовства. Часть I: учебное пособие. Калининград: Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ». 2019. 433 с.
2. Недоступ А.А., Ражев А.О. Моделирование орудий и процессов рыболовства. Часть II: учебное пособие. Калининград: Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ». 2019. 444 с.
3. Fredriksson D.W., Swift M.R., Irish J.D., Tsukrov I., Celikkol B. (2003). Fish cage and mooring system dynamics using physical and numerical models with field measurements. *Aquacult. Eng.* 27. Pp.117-146.
4. Lader P.F., Enerhaug B. (2005). Experimental investigation of forces and geometry of a net cage in uniform flow. *IEEE J. Oceanic Eng.* 30 (1). Pp. 79-84.
5. Suhey J.D., Kim N.H., Niezrecki C. (2005). Numerical modeling and design of inflatable structures-application to open-ocean-aquaculture cages. *Aquacult. Eng.* 33, Pp. 285-303.
6. Сиromская Т.В., Сурков Н.А., Немидова А.А., Чагай Т.А., Гирн А.В. Технология изготовления сетчатых конструкций из композиционных материалов / Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2019. Том 1. С. 350-352.
7. Азаров А.В. Проблема проектирования аэрокосмических сетчатых композитных конструкций. *Механика твердого тела.* 2018, № 4, с. 85-93.
8. Ендогур А.И., Вайнберг М.В., Иерусалимский К.М. Сотовые конструкции. Выбор параметров и проектирование. М.: Машиностроение. 1986. 200 с.

9. Giusto G., Totaro G., Spena P., De Nicola F., Di Caprio F., Zallo A., Grilli A., Mancini V., Kiryenko S., Das S., Mespoulet S. (2021). Composite grid structure technology for space applications. *Materials Today: Proceedings.* vol. 34 (1). Pp. 332-340.
10. Хакленкова А.А. Сетчатая цилиндрическая оболочка с круглым поперечным сечением и переменной жесткостью. // *Вестник СибГАУ.* 2016. № 4. с. 1028-1036.
11. Рекомендации по применению сортирующей системы «Sort-V» на основе одной жесткой решетки при траловом промысле аркто-норвежской трески. Мурманск: Изд-во ПИНРО. 1996. 14 с.
12. Шевченко А.И., Майсс А.А., Акимова О.В. Анализ существующих средств селективности траловых систем на промысле минтая // *Научные труды Дальрыбвтуза.* 2014. Том 32. С. 42-50.
13. Селективные решетки. URL: <http://www.concept-ltd.ru/8760182841> (дата обращения: 22.12.2022).
14. Сортировочная система. URL: <http://sevyrbproject.ru/ru/sortirovochnaya-sistema> (дата обращения: 22.12.2022).
15. Недоступ А.А. Экспериментальная гидромеханика орудий рыболовства. М.: Моркнига. 2014. 363 с.
16. Белов В.А. Гидродинамика нитей, сетей и сетных орудий лова. Калининград: Изд. ОАО МариНПО и Калининградского технического университета. 2000. 202 с.
17. Недоступ А.А., Ражев А.О. Математическая модель взаимодействия распорной траловой доски с водной средой. // *Морские интеллектуальные технологии.* №3 (37). Т.1. 2017. С. 154-157.
18. Недоступ А.А., Ражев А.О. Программное обеспечение для исследования гидродинамики распорных траловых досок. // *Морские интеллектуальные технологии.* №3 (37). Т.1. 2017. С. 168-173.
19. Zhou C., Xu L., Hu F., Qu X. (2015). Hydrodynamic characteristics of knotless nylon netting normal to free stream and effect of inclination. *Ocean Eng.* 110. Pp. 89-97.
20. Zou B., Thierry N.N.B., Tang H., Xu L., Zhou C., Wang X., Dong S., Hu F. (2021). Flow field and drag characteristics of netting of cruciform structures with various sizes of knot structure using CFD models. *Appl. Ocean Res.* 106. 102466.
21. You X., Hu F., Takahashi Y., Shiode D., Dong S. (2021). Resistance performance and uidow investigation of trawl plane netting at small angles of attack. *Ocean Eng.* 236. 109525.
22. Алиев Р.З. О зависимости гидродинамических коэффициентов плоских образцов сетей от числа Рейнольдса // *Рыбное хозяйство.* 1960. № 7. С. 66-67.
23. Белов В.А. Гидродинамика нитей, сетей и сетных конструкций. Калининград: Изд-во МариНПО. 2000. 201 с.
24. Наумов В.А., Бояринова Н.А. Анализ опытных данных, полученных при поперечном обтекании плоских сетей в переходной области сопротивления. Калининград: Известия КГТУ. 2011. № 20. С. 195-202.
25. Наумов В.А., А.В. Кикот Эмпирические зависимости для коэффициента гидродинамического сопротивления  $S_x$  // *Труды VIII международной научной конференции, посвященной 80-летию образования университета: сб. науч. тр. / КГТУ.* Калининград: Изд-во ФГОУ ВПО «КГТУ». 2010. Ч. 1. С. 255-257.
26. Войничанис-Мирский В.Н., Вишневский Е.Е. О сопротивлении сетных элементов стационарных рыболовных орудий // *Рыбное хозяйство.* 1971. №8. С. 47-50.
27. Обвинцев А.Л. Расчет сопротивления и подъемной силы плоских сетей // *Рыбное хозяйство.* 1978. № 1. С. 50-52.
28. Розенштейн М.М., Недоступ А.А. Механика орудий рыболовства. М.: Моркнига. 2011. 528 с.
29. Садовников Ю.М. Натурные испытания тросов. Технический отчет № 19778. Л. 1980. 18 с.
30. Сенин Н.Т. К вопросу о сопротивлении сетей // *Сб. науч. трудов Мосрыбвтуза.* Вып. I. 1939.
31. Фонарев А.Л. Сопротивление круглого цилиндра // *науч. тех. конф. проф.-препод. состава, асп. м студ.: сб. тез. докл. / КТИР-ПИХ.* Калининград, 1994. С. 11-13.
32. Фридман А.Л. Теория и проектирование орудий промышленного рыболовства. М.: Легкая и пищевая промышленность. 1981. 327 с.
33. Ferro R.S. (1990). Force coefficients for stranded and smooth cables. *Scottish fisheries research report.* № 47. p. 10.
34. Imai T. (1979). Basic studies on the plane net set the flowing water. IV: Comparative study of hydro-dynamical resistance on knotted and knotless nettings. *Mem. Fac. Fish., Kagoshima Univ.* Pp. 1276-1282.
35. Kim S-J., Imai T., Kikukawa H. (1991). Analysis on the curvatures of weighted netting in flow field // *Nippon Suisan Gakkaishi.* № 57. Pp. 403-408.

36. Miyazaki Y., Takahashi T. (1964). Basic investigation on the resistances of fishing nets-3. The resistance of plane nets// J. Tokyo Univ. Fish. №50. Pp. 95-102.
37. Miyazaki Y. (1964). Basic investigation on the resistances of fishing nets-12. Discussion on the law of similarity for fishing nets// J. Tokyo Univ. Fish. №50. Pp. 185-189.
38. Miyazaki Y. (1970). Basic investigations on the resistance of fishing nets-V, the resistance of ropes placed obliquely to the stream// J. Tokyo Univ. Fish. №56. Pp. 49-86.
39. Miyazaki Y. (1970). The configuration and tension of rope and a plane net in a uniform stream// J. Tokyo Univ. Fish. №56. Pp. 87-117.
40. Paschen M., Knuths H., Winkel H.J., Ristow E. (2007). Flow investigations of net panels for small angles of attack// Methods for the development and evaluation of maritime technologies DEMAT. p. 23-34.
41. Winkel H.J. (2003). Hydrodynamic forces at a smooth cable - scroustion spiral. Methods for the development and evaluation of maritime technologies. DEMaT. Pp. 251-261.
42. Yamamoto K., Hiraishi T., Kojima T. (1989). Drag of float and rope encrusted with organisms in scallop culture. Nippon Suisan Gakkashi. 55(10). Pp. 1747-1751.

## REFERENCES AND SOURCES

1. Nedostup A.A., Razhev A.O. Modeling of fishing tools and processes. Part I: Study guide. Kaliningrad: Publishing house of FGBOU VO "KSTU". 2019. 433 p. (In Russ.).
2. Nedostup A.A., Razhev A.O. Modeling of fishing tools and processes. Part II: Study guide. Kaliningrad: Publishing house of FGBOU VO "KSTU". 2019. 444 p. (In Russ.).
3. Fredriksson D.W., Swift M.R., Irish J.D., Tsukrov I., Celikkol B. (2003). Fish cage and mooring system dynamics using physical and numerical models with field measurements. Aquacult. Eng. 27. Pp.117-146.
4. Lader P.F., Enerhaug B. (2005). Experimental investigation of forces and geometry of a net cage in uniform flow. IEEE J. Oceanic Eng. 30 (1). Pp. 79-84.
5. Suhey J.D., Kim N.H., Niezrecki C. (2005). Numerical modeling and design of inflatable structures-application to open-ocean-aquaculture cages. Aquacult. Eng. 33, Pp. 285-303.
6. Siromskaya T.V., Surkov N.A., Nemidova A.A., Chagai T.A., Girn A.V. Technology of manufacturing mesh structures from composite materials / Actual problems of aviation and cosmonautics. 2019. Volume 1. Pp. 350-352. (In Russ.).
7. Azarov A.V. The problem of designing aerospace mesh composite structures. Solid state mechanics. 2018. No. 4. Pp. 85-93. (In Russ.).
8. Endogur A.I., Vainberg M.V., Jerusalem K.M. Cellular structures. Selection of parameters and design. M.: Mechanical Engineering. 1986. 200 p. (In Russ.).
9. Giusto G., Totaro G., Spina P., De Nicola F., Di Caprio F., Zallo A., Grilli A., Mancini V., Kiryenko S., Das S., Mespoulet S. (2021). Composite grid structure technology for space applications. Materials Today: Proceedings. vol. 34 (1). Pp. 332-340.
10. Khakhlenkova A.A. A mesh cylindrical shell with a circular cross-section and variable stiffness. // Bulletin of SibGAU. 2016. No. 4. Pp. 1028-1036. (In Russ.).
11. Recommendations for the use of the sorting system "Sort-V" based on a single rigid grid for trawling Arctic-Norwegian cod. Murmansk: PINRO Publishing House. 1996. 14 p. (In Russ.).
12. Shevchenko A.I., Maiss A.A., Akimova O.V. Analysis of existing means of selectivity of trawl systems in the pollock fishery// Scientific works of Dalrybvtuz. 2014. Volume 32. Pp. 42-50. (In Russ.).
13. Selective lattices. URL: <http://www.concept-ltd.ru/8760182841> (accessed: 12/22/2022).
14. Sorting system. URL: <http://sevrbyproject.ru/ru/sortirovochnaya-sistema> (date of reference: 12/22/2022).
15. Nedostup A.A. Experimental hydromechanics of fishing gear. M.: Morkniga. 2014. 363 p. (In Russ.).
16. Belov V.A. Hydrodynamics of threads, nets and net fishing gear. Kaliningrad: Ed. JSC MariNPO and Kaliningrad Technical University. 2000. 202 p. (In Russ.).
17. Nedostup A.A., Razhev A.O. Mathematical model of interaction of a spacer trawl board with an aquatic environment. // Marine intelligent technologies. No.3 (37). Vol.1. 2017. pp. 154-157. (In Russ.).
18. Nedostup A.A., Razhev A.O. Software for the study of hydrodynamics of spacer trawl boards. // Marine intelligent technologies. No.3 (37). Vol.1. 2017. Pp. 168-173. (In Russ.).
19. Zhou C., Xu L., Hu F., Qu X. (2015). Hydrodynamic characteristics of knotless nylon netting normal to free stream and effect of inclination. Ocean Eng. 110. Pp. 89-97.
20. Zou B., Thierry N.N.B., Tang H., Xu L., Zhou C., Wang X., Dong S., Hu F. (2021). Flow field and drag characteristics of netting of cruciform structures with various sizes of knot structure using CFD models. Appl. Ocean Res. 106. 102466.
21. You X., Hu F., Takahashi Y., Shiode D., Dong S. (2021). Resistance performance and uidow investigation of trawl plane netting at small angles of attack. Ocean Eng. 236. 109525.
22. Aliev R.Z. On the dependence of the hydrodynamic coefficients of flat network samples on the Reynolds number// Fisheries. 1960. No. 7. Pp. 66-67. (In Russ.).
23. Belov V.A. Hydrodynamics of threads nets and mesh structures. Kaliningrad: MariNPO Publishing House. 2000. 201 p. (In Russ.).
24. Naumov V.A., Boyarinova N.A. Analysis of experimental data obtained during the transverse flow of flat networks in the transition region of resistance. Kaliningrad: Izvestiya KSTU. 2011. No. 20. Pp. 195-202. (In Russ.).
25. Naumov V.A., A.V. Kikot Empirical dependences for the coefficient of hydrodynamic resistance Cx // Proceedings of the VIII International Scientific Conference dedicated to the 80th anniversary of the University: collection of scientific tr. / KSTU. Kaliningrad: Publishing house of FGOU VPO "KSTU". 2010. Part 1. Pp. 255-257. (In Russ.).
26. Voynikanis-Mirsky V.N., Vishnevsky E.E. On the resistance of the net elements of stationary fishing gear // Fisheries. 1971. No.8. Pp. 47-50. (In Russ.).
27. Accusantsev A.L. Calculation of resistance and lifting force of flat nets// Fisheries. 1978. No. 1. Pp. 50-52. (In Russ.).
28. Rosenstein M.M., Nedostup A.A., Mechanics of fishing tools. M.: Morkniga. 2011. 528 p. (In Russ.).
29. Sadovnikov Yu.M. Full-scale testing of cables. Technical Report No. 19778. L. 1980. 18 p. (In Russ.).
30. Senin N.T. On the question of the resistance of networks // Collection of scientific works of Mosrybvtuz. Issue I. 1939. (In Russ.).
31. Fonarev A.L. Resistance of a round cylinder // scientific. technical conf. prof.-teacher. composition, asp. m student.: sat. tez. dokl. / KTRPIH. Kaliningrad, 1994. Pp. 11-13. (In Russ.).
32. Friedman A.L. Theory and design of tools for industrial fishing. M.: Light and food industry. 1981. 327 p. (In Russ.).
33. Ferro R.S. (1990). Force coefficients for stranded and smooth cables. Scottish fisheries research report. № 47. p. 10.
34. Imai T. (1979). Basic studies on the plane net set the flowing water. IV: Comparative study of hydro-dynamical resistance on knotted and knotless nettings. Mem. Fac. Fish., Kagoshima Univ. Pp. 1276-1282.
35. Kim S-J., Imai T., Kikukawa H. (1991). Analysis on the curvatures of weighted netting in flow field// Nippon Suisan Gakkashi. № 57. Pp. 403-408.
36. Miyazaki Y., Takahashi T. (1964). Basic investigation on the resistances of fishing nets-3. The resistance of plane nets// J. Tokyo Univ. Fish. №50. Pp. 95-102.
37. Miyazaki Y. (1964). Basic investigation on the resistances of fishing nets-12. Discussion on the law of similarity for fishing nets// J. Tokyo Univ. Fish. №50. Pp. 185-189.
38. Miyazaki Y. (1970). Basic investigations on the resistance of fishing nets-V, the resistance of ropes placed obliquely to the stream// J. Tokyo Univ. Fish. №56. Pp. 49-86.
39. Miyazaki Y. (1970). The configuration and tension of rope and a plane net in a uniform stream// J. Tokyo Univ. Fish. №56. Pp. 87-117.
40. Paschen M., Knuths H., Winkel H.J., Ristow E. (2007). Flow investigations of net panels for small angles of attack// Methods for the development and evaluation of maritime technologies DEMAT. p. 23-34.
41. Winkel H.J. (2003). Hydrodynamic forces at a smooth cable - scroustion spiral. Methods for the development and evaluation of maritime technologies. DEMaT. Pp. 251-261.
42. Yamamoto K., Hiraishi T., Kojima T. (1989). Drag of float and rope encrusted with organisms in scallop culture. Nippon Suisan Gakkashi. 55 (10). Pp. 1747-1751.

Материал поступил в редакцию / Received 28.04.2023  
После рецензирования / Revised 03.05.2023  
Принят к публикации / Accepted 29.05.2023