Научная статья
УДК 639.2/.3:51-7; 639.2/.3:007; 629.562.2
DOI 10.46845/1997-3071-2026-80-

Численное моделирование гидродинамики осесимметричной сетной конструкции методом «вихрь – функция тока»

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

[1,2,3,4] Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия
[1]aleksej.razhev@klgtu.ru✉
[2]nedostup@klgtu.ru
[3]pavel.nasenkov@klgtu.ru
[4]karina.konovalova@klgtu.ru

Аннотация. В статье представлены математическая и имитационная модель для моделирования гидродинамики таких осесимметричных сетных конструкций, как траловый мешок методом «вихрь – функция тока». Новизной исследования является сведение задачи к расчету в двухмерной системе координат, что уменьшит трудоемкость вычислений и ускорит процесс получения результата. Описаны достоинства и недостатки метода. Представлены системы уравнений в частных производных, а также конечно-разностные схемы и методы их решения. Обозначены начальные и граничные условия. Предложены алгоритмы решения уравнений Навье-Стокса и Пуассона для гетерогенной вычислительной системы. Рассмотрена неявная конечно-разностная схема и решение методами расщепления с получением трехдиагональных систем линейных уравнений. Показано их решение методом прогонки. Приведен результат численного моделирования ω–ψ методом на разработанной программе для ЭВМ. Полученные результаты сопоставлены с результатами численного моделирования на основе эвристических зависимостей. Показано, что результаты численного моделирования согласуются с данными натурного эксперимента в гидроканале. Область применения: научные исследования, учебный процесс, проектирование и эксплуатация рыболовных тралов, системы виртуальной реальности.

Ключевые слова: гидродинамика, траловый мешок, вихрь – функция тока, гетерогенная система, численное моделирование, уравнение Пуассона.

Финансирование: Исследование выполнено в ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» за счет гранта Российского научного фонда № 25-21-00008, https://rscf.ru/project/25-21-00008/.

Для цитирования: Ражев А. О., Недоступ А. А., Насенков П. В., Коновалова К. В. Численное моделирование гидродинамики осесимметричной сетной конструкции методом «вихрь – функция тока» // Известия КГТУ. 2026. № 80. С. –. DOI 10.46845/1997-3071-2026-80-

Original article

Numerical simulation of hydrodynamics of an axisymmetric grid structure using the "vortex – current function" method

Aleksey O. Razhev[1]✉, Aleksandr A. Nedostup[2], Pavel V. Nasenkov[3], Karina V. Konovalova[4]

[1,2,3,4] Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia
[1]aleksej.razhev@klgtu.ru✉
[2]nedostup@klgtu.ru
[3]pavel.nasenkov@klgtu.ru
[4]karina.konovalova@klgtu.ru

Abstract. The article presents a mathematical and simulation model for modeling the hydrodynamics of axisymmetric mesh structures such as a trawl codend using the vortex–current function method. The novelty of the research is to reduce the problem to calculation in a two-dimensional coordinate system, which will reduce the complexity of calculations and speed up the process of obtaining a result. The advantages and disadvantages of the method are described. Systems of partial differential equations, as well as finite difference schemes and methods for their solution are presented. The initial and boundary conditions are indicated. Algorithms for solving the Navier-Stokes and Poisson equations for a heterogeneous computing system are proposed. An implicit finite-difference scheme and a solution by splitting methods to obtain tridiagonal systems of linear equations are considered. Their solution by the run-through method is shown. The result of numerical simulation using the ω–ψ method on the developed computer program is presented. The obtained results are compared with the results of numerical modeling based on heuristic dependencies. It is shown that the results of numerical simulation are consistent with the data of a field experiment in a hydraulic channel. Scope of application: scientific research, educational process, design and operation of fishing trawls, virtual reality systems.

Keywords: hydrodynamics, trawl codend, vortex – current function, heterogeneous system, numerical modeling, Poisson equation.

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, https://rscf.ru/project/25-21-00008/.

For citation: Razhev A. O., Nedostup A. A., Nasenkov P. V., Konovalova K. V. Numerical simulation of hydrodynamics of an axisymmetric grid structure using the "vortex – current function" method. *Izvestiya KGTU = KSTU News.* 2026;(80):–. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2026-80-

ВВЕДЕНИЕ

Сетные инженерные конструкции являются ключевым технологическим элементом в таких областях, как промышленный рыбный промысел и аквакультура. Один из основных компонентов рыболовного трала – траловый мешок. Эффективность тралового лова и качество улова во многом зависят от формы тралового мешка, которая, в свою очередь, определяется действующими на него внутренними (натяжения) и внешними (гидродинамическими) силами. Эти параметры необходимо учитывать при проектировании рыбопромысловых судов.

Конструктивно траловый мешок представляет собой осесимметричную сетную конструкцию (рис. 1).

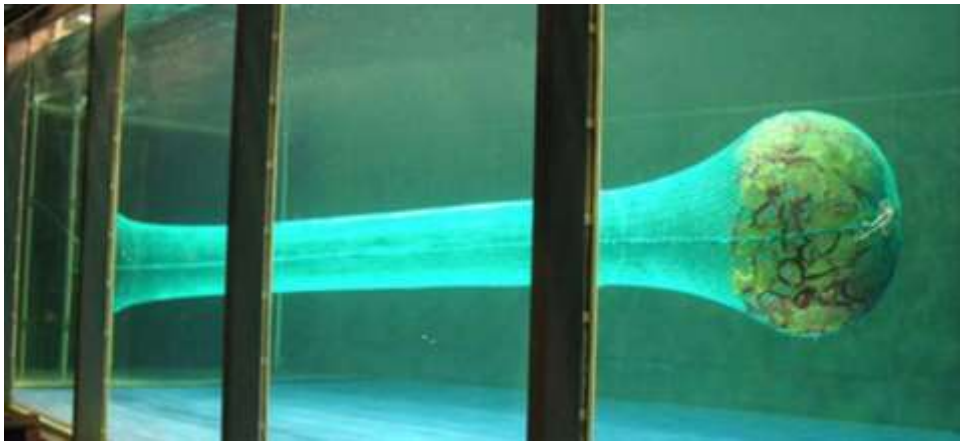

Рис. 1. Траловый мешок
Fig. 1. Trawl codend

В процессе траления на траловый мешок действуют гидродинамические силы, вызванные движением мешка в потоке воды. Для их определения с целью предварительной оценки можно воспользоваться эвристическими зависимостями [1]. Для более точного расчета необходимо учитывать такие гидродинамические характеристики, как поле давлений и скоростей вблизи поверхности тралового мешка.

Кроме формы тралового мешка на эффективность лова влияют характеристики течения внутри мешка, в том числе в режимах изменения скорости траления, при которых возникают переходные процессы.

Для определения характеристик течения в указанных режимах работы трала необходимо вычислять гидродинамические поля внутри тралового мешка и их изменение с течением времени (в динамике).

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Методы, основанные на вычислении гидродинамических характеристик при помощи эвристических зависимостей [1], подходят только для установившихся режимов работы трала. Для оценки влияния переходных процессов необходимо осуществлять гидродинамический расчет, основанный на системах уравнений Навье-Стокса.

Поставим задачу определения гидродинамических полей посредством математического моделирования сетной инженерной конструкции на примере тралового мешка. При условии, что плотность элементов сетной конструкции и улова близка к плотности жидкости, в которую погружена конструкция (справедливо для тралового мешка), силы гидродинамического сопротивления будут многократно превышать гидростатические. В нормальном режиме работы вектор скорости перемещения тралового мешка параллелен его оси. С учетом изложенного гидростатическими силами можно пренебречь, а задачу свести к расчету в двухмерной системе координат, что уменьшит трудоемкость вычислений и ускорит процесс моделирования и получения результата.

Для решения задач гидродинамики существуют различные методы, такие как «давление – скорость» и «вихрь – функция тока» [2, 3]. Преимуществом метода «вихрь – функция тока» перед методом «давление – скорость» являются:

– автоматическое выполнение условия несжимаемости жидкости;

– отсутствие давления в системе уравнений и, соответственно, отсутствие необходимости в граничных условиях для давления;

– уменьшение количества уравнений – вместо 3-х уравнений в методе «давление – скорость» при двумерной постановке задачи решаются два;

– удобство визуализации; линии с постоянным значением функции тока являются линиями тока жидкости, что делает функцию тока идеальным инструментом для визуализации структуры течения; вихревое поле наглядно показывает области вращения жидкости и наличие вихрей.

Главным недостатком метода «вихрь – функция тока» является невозможность его применения при трехмерной постановке задачи. Указанный недостаток не критичен для расчета гидродинамики осесимметричных тел, находящихся в потоке, направленном вдоль оси симметрии. При такой постановке задачу можно решать в двухмерной системе координат.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Введем расчетную декартову систему координат О*ху*. Ось О*х* направим вправо, вдоль оси симметрии сетной конструкции, а ось О*у* – от оси симметрии вверх. На рис. 2 представлена система координат для расчета тралового мешка.

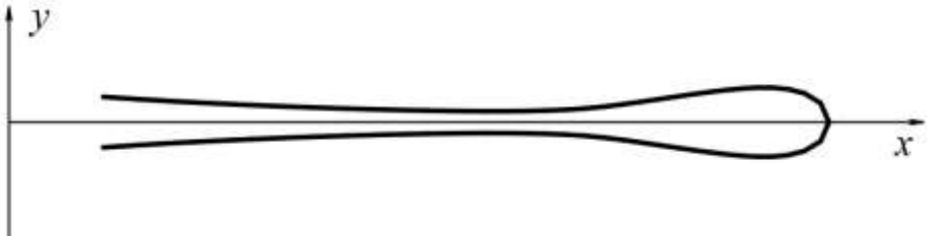

Рис. 2. Система координат для расчета тралового мешка
Fig. 2. The coordinate system for calculating the codend

При решении задач гидродинамики методом «вихрь – функция тока» (далее – ω–ψ методом) вводятся понятия полей вихря ω и функции тока ψ:

$$\omega = \frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y}, \tag{1}$$

$$v_x = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad v_y = -\frac{\partial \psi}{\partial x}, \tag{2}$$

где v_x, v_y – проекции скорости потока жидкости в произвольной точке на плоскости Oxy на оси координат.

Запишем уравнения неразрывности и Навье-Стокса для вязкой несжимаемой жидкости в векторной форме:

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \tag{3}$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla)\mathbf{v} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{v}, \tag{4}$$

где $\mathbf{v}$ – вектор скорости потока жидкости в произвольной точке пространства (плоскости – для двумерного случая); t – время; ρ – плотность жидкости; p – давление жидкости в произвольной точке пространства (плоскости – для двумерного случая); ν – кинематическая вязкость жидкости.

Перепишем (3) для двумерного случая, а (4) для x-компоненты вектора скорости:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0, \tag{5}$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} = \nu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}. \tag{6}$$

Для y-компоненты уравнение (6) выглядит аналогично.

Подставив (6) для обеих x и y компонент скорости в (1) (продифференцировав по y и x соответственно) с учетом (5), получим уравнение Гельмгольца [4]:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + v_x \frac{\partial \omega}{\partial x} + v_y \frac{\partial \omega}{\partial y} = \nu \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right). \quad (7)$$

Подставив (2) в (1), получим уравнение Пуассона [5]:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -\omega. \quad (8)$$

Уравнения (2), (7) и (8) вместе с начальными и граничными условиями образуют полную систему, в которой нет давления, при этом условие несжимаемости жидкости (3) выполняется автоматически, а для нахождения решения необходимо решить только два уравнения – Гельмгольца и Пуассона.

В качестве начальных условий для полей скоростей, вихря и функции тока примем

$$v_x = v_w,\ v_y = 0,\ \omega = 0,$$

$$\psi(y) = \int v_w dy,\ \psi(0) = 0,$$

где v_w – заданная скорость набегающего потока жидкости.

Зададим граничные условия. На границах расчетной сетки для вихря применим граничное условие первого рода, для функции тока – второго рода (условие Неймана):

$$\omega = 0,$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial y} = v_x \text{ – на левой и правой границах,}$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} = -v_y \text{ – на верхней и нижней границах.}$$

На поверхности непроницаемой стенки применим обобщенное условие Томсона [2]:

$$\omega_b = -\frac{\partial^2 \psi}{\partial \mathbf{n}^2}, \quad (9)$$

где ω_b – вихрь на полностью непроницаемой стенке; $\boldsymbol{n}$ – вектор нормали к поверхности, направленный от сетной конструкции.

С учетом сплошности сетной поверхности F_O перепишем граничное условие (9):

$$\omega = F_O \omega_b + \omega_w,$$

где ω_w – вихрь в жидкости, вычисленный согласно (7).

На рис. 3 приведен алгоритм решения для одного временного шага τ.

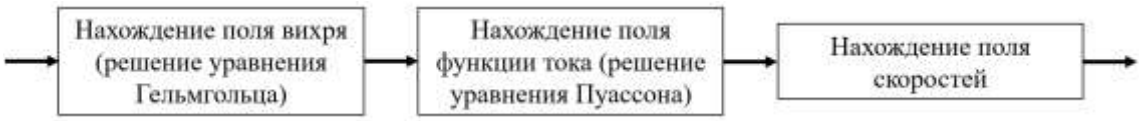

Рис. 3. Алгоритм решения ω–ψ методом
Fig. 3. The algorithm for solving the ω–ψ method

Нахождение поля вихря осуществляется по аналогии с решением уравнения Навье-Стокса методом «давление – скорость». При использовании неявной конечно-разностной аппроксимации на регулярной сетке с шагом h по осям Ox и Oy и метода расщепления каждый временной шаг k дробится на два. Уравнение (7) расщепляется на два, первое уравнение – вдоль оси Ox, второе – вдоль оси Oy:

$$\frac{\omega^{\langle k+\frac{1}{2}\rangle}-\omega^{\langle k\rangle}}{\tau}=-v_x\left(\frac{\partial\omega}{\partial x}\right)^{\langle k+\frac{1}{2}\rangle}+\nu\left(\frac{\partial^2\omega}{\partial x^2}\right)^{\langle k+\frac{1}{2}\rangle}, \tag{10}$$

$$\frac{\omega^{\langle k+1\rangle}-\omega^{\langle k+\frac{1}{2}\rangle}}{\tau}=-v_y\left(\frac{\partial\omega}{\partial y}\right)^{\langle k+1\rangle}+\nu\left(\frac{\partial^2\omega}{\partial y^2}\right)^{\langle k+1\rangle}, \tag{11}$$

$$v_x\left(\frac{\partial\omega}{\partial x}\right)^{\langle k+\frac{1}{2}\rangle}=\frac{\left(v_{xi,j}+\left|v_{xi,j}\right|\right)\left(\omega_{i,j}^{\langle k+\frac{1}{2}\rangle}-\omega_{i-1,j}^{\langle k+\frac{1}{2}\rangle}\right)+\left(v_{xi,j}-\left|v_{xi,j}\right|\right)\left(\omega_{i+1,j}^{\langle k+\frac{1}{2}\rangle}-\omega_{i,j}^{\langle k+\frac{1}{2}\rangle}\right)}{2h}, \tag{12}$$

$$v_y\left(\frac{\partial\omega}{\partial y}\right)^{\langle k+1\rangle}=\frac{\left(v_{yi,j}+\left|v_{yi,j}\right|\right)\left(\omega_{i,j}^{\langle k+1\rangle}-\omega_{i,j-1}^{\langle k+1\rangle}\right)+\left(v_{yi,j}-\left|v_{yi,j}\right|\right)\left(\omega_{i,j+1}^{\langle k+1\rangle}-\omega_{i,j}^{\langle k+1\rangle}\right)}{2h}, \tag{13}$$

$$\left(\frac{\partial^2\omega}{\partial x^2}\right)^{\langle k+\frac{1}{2}\rangle}=\frac{\omega_{i-1,j}^{\langle k+\frac{1}{2}\rangle}-2\omega_{i,j}^{\langle k+\frac{1}{2}\rangle}+\omega_{i+1,j}^{\langle k+\frac{1}{2}\rangle}}{h^2},$$

$$\left(\frac{\partial^2\omega}{\partial y^2}\right)^{\langle k+1\rangle}=\frac{\omega_{i,j-1}^{\langle k+1\rangle}-2\omega_{i,j}^{\langle k+1\rangle}+\omega_{i,j+1}^{\langle k+1\rangle}}{h^2},$$

где k – номер шага. В угловых скобках обозначены индексы дробных шагов.

Уравнение (10) разрешается относительно неизвестной ω на дробном шаге k + 1/2, а уравнение (11) – на дробном шаге k + 1. С целью повышения устойчивости метода в (12) и (13) применяются противоточные производные [3, 5].

Нахождение поля скоростей из поля функции тока выполняется по конечно-разностной схеме:

$$v_{x\,i,j}=\frac{\psi_{i+1,j}-\psi_{i-1,j}}{2h},\ v_{y\,i,j}=\frac{\psi_{i,j+1}-\psi_{i,j-1}}{2h}.$$

Уравнения (10) и (11) являются линейными. Для нахождения поля вихря на каждом временном дробном шаге необходимо решить систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Приведем (9) и (10) к матричному виду:

$$\mathbf{A}\boldsymbol{\omega} = \mathbf{d},$$

где $\boldsymbol{A}$ – матрица коэффициентов при векторе-столбце неизвестных $\boldsymbol{\omega}$; $\boldsymbol{d}$ – вектор-столбец правых частей уравнения.

Поскольку матрица **A** является трехдиагональной, полученные СЛАУ можно решить методом прогонки [3, 5]. На прямом проходе для $i = [1 \ldots n]$ получаем:

$$\delta_i = -a_{i,i+1} / \left(a_{i,i} + a_{i,i-1}\delta_{i-1}\right),\ \beta_i = \left(d_i - a_{i,i-1}\beta_{i-1}\right) / \left(a_{i,i} + a_{i,i-1}\delta_{i-1}\right),$$

где β и δ – временные переменные; $\beta_0 = 0$, $\delta_0 = 0$, $a_{1,i-1} = 0$, $a_{n,i+1} = 0$; n – количество узлов расчетной сетки вдоль разрешаемого направления (Ox – для (9), Oy – для (10)).

На обратном проходе для $i = [n \ldots 1]$ получаем:

$$\omega_i = \delta_i \omega_{i+1} + \beta_i$$

при $\omega_{n+1} = 0$**.**

Для нахождения поля вихря (рис. 3) необходимо решить уравнение Пуассона (8). Для этого применяют численные методы Ричардсона или Либмана с верхней релаксацией [6]. Метод Ричардсона, в отличие от метода Либмана, требует наличия промежуточного массива данных и легко распараллеливается. Метод Либмана требует обновления промежуточных значений искомой величины сразу после ее вычисления на каждом шаге последовательного приближения, но при последовательных вычислениях имеет более высокую скорость сходимости. В связи с этим в гетерогенных вычислительных системах [7] мы используем оба метода, первый – для вычислений на графическом процессоре (GPU), второй – на центральном процессоре (CPU). Запишем конечно-разностные схемы для метода Ричардсона:

$$\psi_{i,j}^{\langle k+1\rangle} = \frac{1}{4}\left(\psi_{i+1,j}^{\langle k\rangle} + \psi_{i-1,j}^{\langle k\rangle} + \psi_{i,j+1}^{\langle k\rangle} + \psi_{i,j-1}^{\langle k\rangle} + h^2\omega_{i,j}\right)$$

и метода Либмана с верхней релаксацией:

$$\psi_{i,j}^{\langle k+1\rangle} = \left(1-\theta\right)\psi_{i,j}^{\langle k\rangle} + \frac{\theta}{4}\left(\psi_{i+1,j}^{\langle k\rangle} + \psi_{i-1,j}^{\langle k+1\rangle} + \psi_{i,j+1}^{\langle k\rangle} + \psi_{i,j-1}^{\langle k+1\rangle} + h^2\omega_{i,j}\right),$$

где θ – константа, влияющая на скорость схождения алгоритма.

Хорошие результаты получаются при

$$\theta = \frac{1}{2\xi^2}\left(1-\sqrt{1-\xi^2}\right),\ \xi = \frac{1}{2}\left(\cos\frac{\pi}{n_x}+\cos\frac{\pi}{n_y}\right),$$

где n_x, n_y – размеры расчетной сетки; ξ – промежуточная величина.

Запишем условие завершения итерационного процесса при решении уравнения Пуассона:

$$\max\left|\psi_{i,j}^{\langle k+1\rangle}-\psi_{i,j}^{\langle k\rangle}\right|<\varepsilon_\psi,$$

где ε_ψ – заданная максимальная погрешность функции тока.

Вычисление условия завершения требует последовательных обращений к переменной, содержащей текущую погрешность. Для вычислений на CPU с этим сложностей не возникает. Для вычислений на GPU, когда множество вычислительных блоков работают по одному алгоритму, необходимо предотвращать одновременное обновление переменной с текущей погрешностью. Для этой цели можно применять алгоритм параллельной редукции с использованием разделяемой памяти. Суть его заключается в разбиении всей расчетной сетки на блоки, которые в свою очередь разбиваются на вложенные блоки. Поиск максимума осуществляется в каждом блоке последовательно, а блоки обрабатываются параллельно во времени. В полученном дереве поиска уровни вложения обрабатываются последовательно от листьев к корню. Для каждого вложенного блока заводится своя переменная текущей погрешности. Ее значение учитывается следующим уровнем. Процесс повторяется до достижения корня дерева.

При решении уравнения Пуассона на GPU можно использовать упрощенный алгоритм, не требующий вычисления максимума погрешности. Суть его заключается в создании внешнего цикла с заданным количеством итераций. Недостатком алгоритма является отсутствие контроля погрешности. Для уменьшения погрешности необходимо увеличивать количество циклов, что в свою очередь может приводить к избыточности вычислений.

Для нахождения сил, действующих на сетную конструкцию, необходимо вычислять давление жидкости вблизи сетной конструкции, но ω–ψ метод в своих итерациях не вычисляет поле давлений. Поле давлений p находится из поля функции тока путем решения уравнения Пуассона:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 p}{\partial y^2}=2\left(\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2}\frac{\partial^2\psi}{\partial y^2}-\left(\frac{\partial^2\psi}{\partial x\partial y}\right)^2\right).$$

Это требует дополнительных вычислительных затрат и делает нахождение поля давлений на каждом временном шаге нецелесообразным для решения поставленной задачи. Его вычисление возможно во внешних, более редких циклах либо однократно для установившегося режима.

Решение уравнения Пуассона для нахождения поля давлений выполняется аналогично решению уравнения (8).

На рис. 4– 8 приведены поля скоростей, давлений, вихря, полученные разработанной по описанному методу программой для ЭВМ.

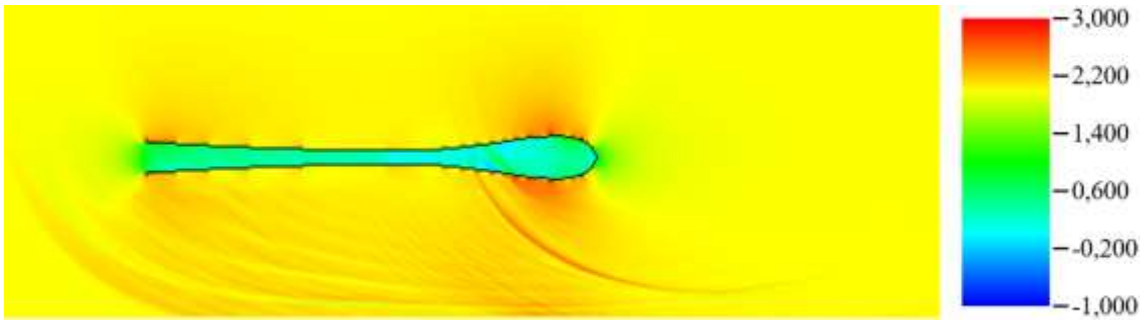

Рис. 4. Поле скоростей v_x
Fig. 4. Velocity v_x field

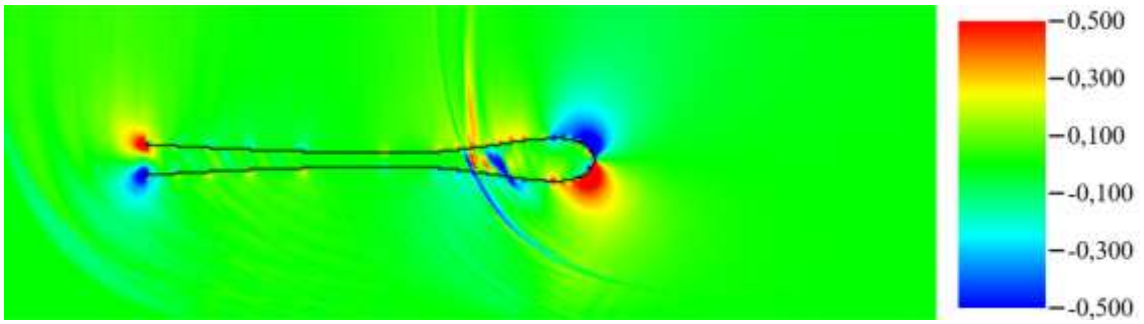

Рис. 5. Поле скоростей v_y
Fig. 5. Velocity v_y field

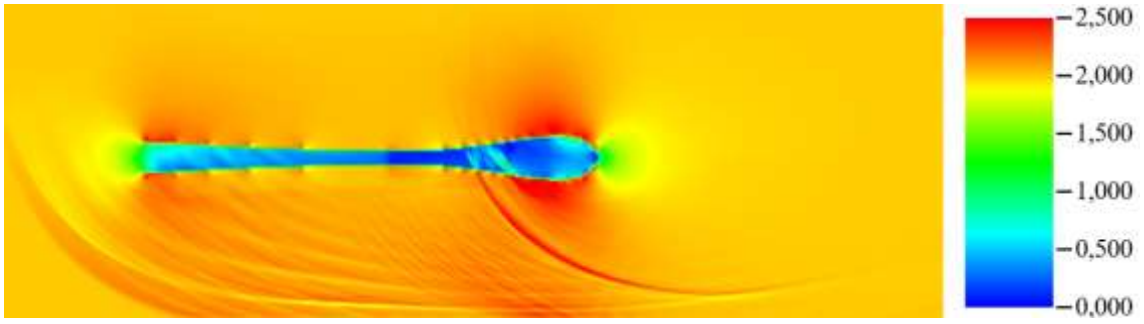

Рис. 6. Поле модуля скоростей
Fig. 6. Velocity modulus field

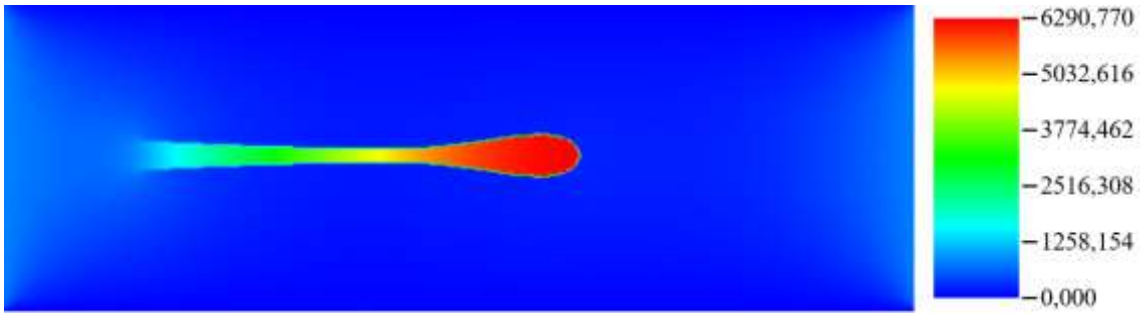

Рис. 7. Поле давлений
Fig. 7. Pressure field

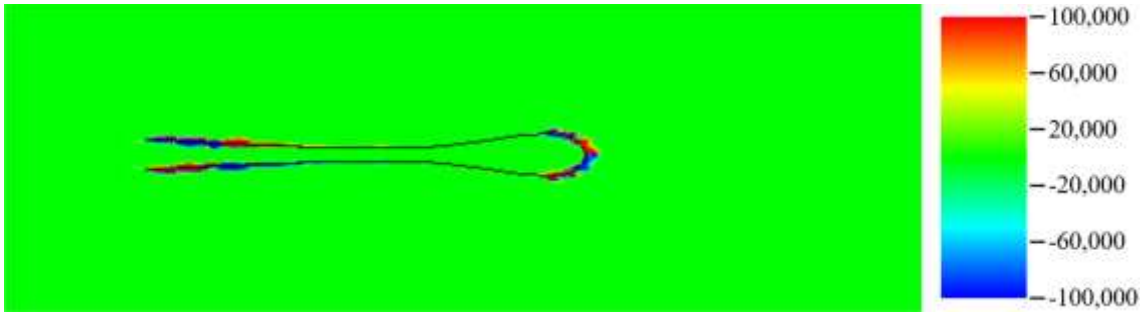

Рис. 8. Поле вихря
Fig. 8. Vortex field

На рис. 9 показаны линии тока.

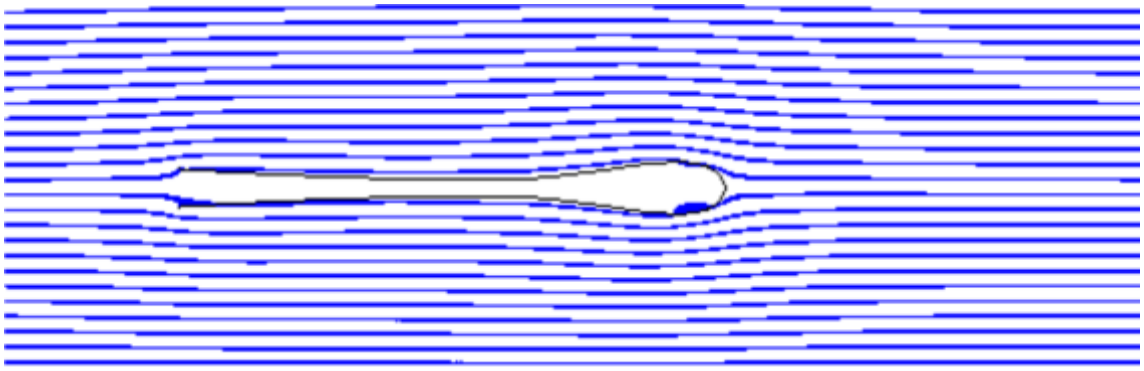

Рис. 9. Линии тока
Fig. 9. Current lines

Вектор силы гидродинамического сопротивления **R** сетной конструкции находится по формуле:

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_p + \mathbf{R}_f\,,\ \mathbf{R}_p = \iint\limits_S F_O\, p\mathbf{n}ds\,,\ \mathbf{R}_f = \iint\limits_S F_O \rho\nu \frac{d\mathbf{v}_s}{d\mathbf{n}} ds\,,$$

где $\mathbf{R}_p$ – сила давления жидкости на конструкцию; $\mathbf{R}_f$ – сила трения жидкости о конструкцию; S – поверхность сетной конструкции; $\mathbf{n}$ – вектор нормали к элементарной поверхности ds, направленный от конструкции; $\mathbf{v}_s$ – проекция вектора скорости на плоскость, параллельную элементарной поверхности ds.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По предложенной математической модели авторами была разработана программа для ЭВМ «Гидродинамический расчет сетных инженерных конструкций» (рис. 10), моделирующая поведение осесимметричной сетной инженерной конструкции, находящейся в потоке жидкости с заданными плотностью, вязкостью и скоростью.

При расчете применяется метод «вихрь – функция тока». В процессе моделирования отображаются поля скоростей, давлений, вихря и функции тока, а также их числовые значения. Производится расчет силы гидродинамического сопротивления.

Для численного эксперимента был взят траловый мешок со следующими конструктивными характеристиками: количество ячей по длине m = 20; количество ячей по окружности n = 10; диаметр веревки d = 2 мм; коэффициент утолщения узла k_y = 3. Параметры внешнего воздействия: v = 2 м/с; ρ = 1030 кг/м^3; υ = 1,004 мм^2/с. По входным параметрам при помощи разработанной программы для ЭВМ «Гидродинамика тралового мешка» (рис. 11) был получен профиль сетной поверхности под действием гидродинамических сил, вычисленных по эвристическим зависимостям (14)–(18) для сети [1].

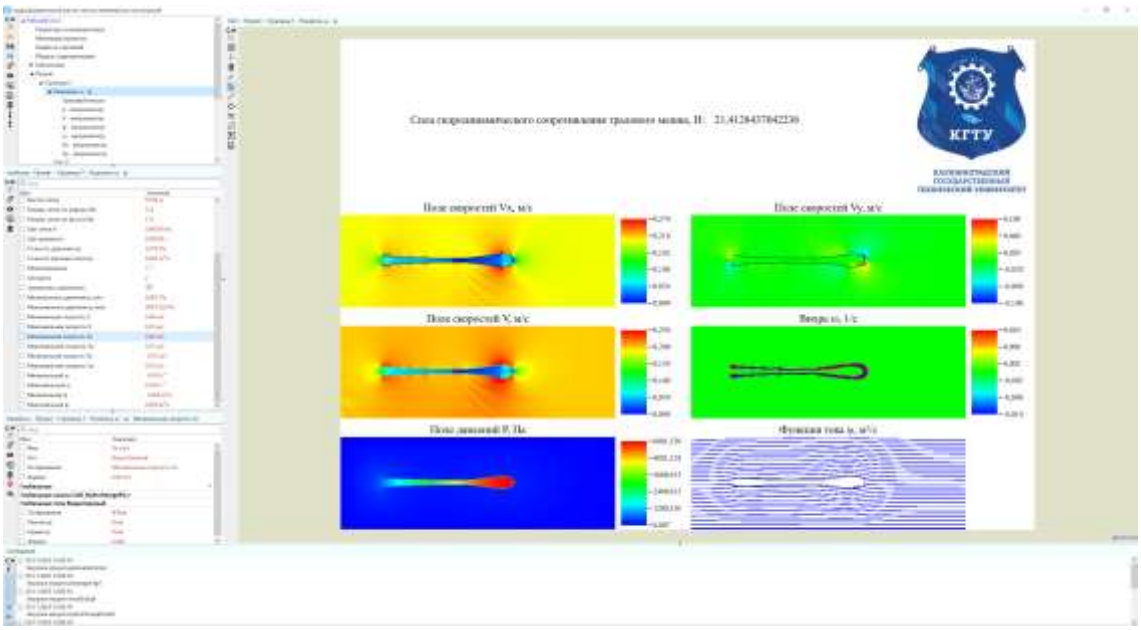

Рис. 10. Программа для ЭВМ «Гидродинамический расчет сетных инженерных конструкций»
Fig. 10. Computer program "Hydrodynamic calculation of grid engineering structures"

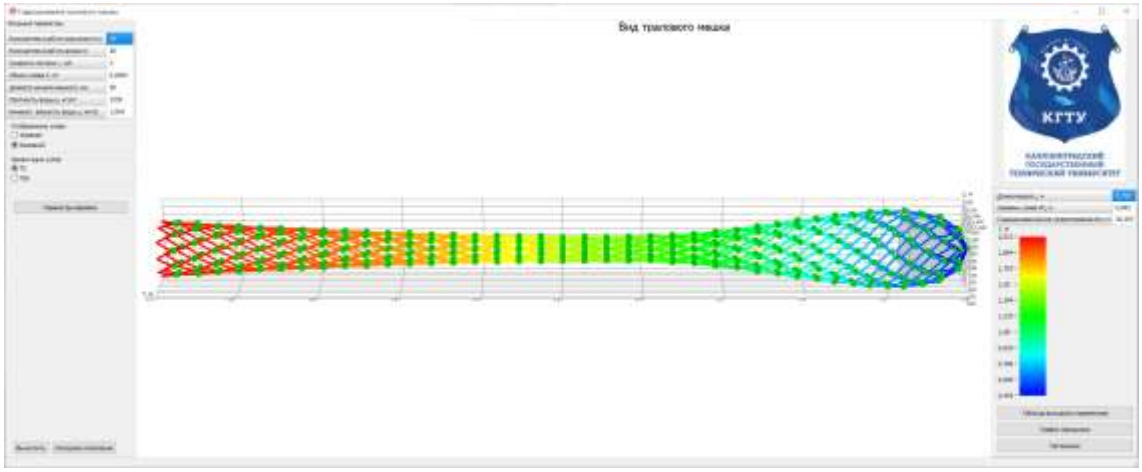

Рис. 11. Программа для ЭВМ «Гидродинамика тралового мешка»
Fig. 11. Computer program "Hydrodynamics of a codend"

$$R_x = c_x \frac{\rho v^2}{2} F_{\text{Н}},\ R_y = c_y \frac{\rho v^2}{2} F_{\text{Н}}, \tag{14}$$

$$c_x = c_0 + \left(c_{90} - c_0\right)\left|\Delta y / l\right|,\ c_y = c_{90}\Delta x \Delta y / l^2, \tag{15}$$

$$c_0 = F_O \,\text{Re}^{-0{,}165},\ c_{90} = 16\left(2F_O / \text{Re}\right)^{0{,}28}, \tag{16}$$

$$F_{\text{Н}} = da_0 + \pi d_n^2 / 8, \tag{17}$$

$$\text{Re} = dv / \nu, \tag{18}$$

где R_x – гидродинамическая сила лобового сопротивления; R_y – гидродинамическая распорная сила; c_x, c_y – гидродинамические коэффициенты для сети, расположенной под углом к потоку жидкости; c_0 – гидродинамический коэффициент для сети, расположенной параллельно потоку; c_{90} – гидродинамический коэффициент для сети, расположенной перпендикулярно потоку; l – расстояние между узлами сети в плоскости Oxy; Δx, Δy – проекции l на оси координат; $F_{\text{Н}}$ – площадь сечения веревки и половины узла; Re – число Рейнольдса; u_x, u_y – посадочные коэффициенты ячеи по длине и окружности сетной конструкции соответственно; a_0 – шаг ячеи; y – радиус окружности, проходящей через узел сети.

Полученный профиль с информацией о сплошности участков тралового мешка, а также параметры внешнего воздействия были загружены в программу для ЭВМ «Гидродинамический расчет сетных инженерных конструкций». В процессе моделирования был достигнут установившийся режим и получены поля скоростей, давлений, вихря, функции тока, линии тока и сила гидродинамического сопротивления. Моделирование производилось на расчетной сетке размерами 512 на 172 узлов с шагом h = 0,003 м.

Значение силы гидродинамического сопротивления тралового мешка R_x = 21,4 Н, полученное при помощи программы для ЭВМ «Гидродинамический расчет сетных инженерных конструкций», было сопоставлено со значением R_x = 20,4 Н, полученным при помощи программы для ЭВМ «Гидродинамика тралового мешка».

С учетом того, что итоговые результаты при помощи программы для ЭВМ «Гидродинамика тралового мешка» согласуются с таковыми при натурном эксперименте в гидроканале [8], можно сделать вывод об адекватности предложенного метода расчета осесимметричных сетных конструкций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования можно применять при проектировании, модернизации и эксплуатации высокоэффективных рыболовных тралов, в развитии рыбопромыслового судостроения, в системах виртуальной реальности (тренажерных комплексах), дальнейших фундаментальных и прикладных научных исследованиях в области гидромеханики сетных инженерных конструкций в целом и орудий рыболовства и рыбопромысловых судов в частности.

Результаты исследования позволят:

– рассчитывать и минимизировать лобовое сопротивление орудий лова, что напрямую ведет к снижению расхода топлива промысловыми судами;

– проектировать геометрию трала, обеспечивающую его стабильное и предсказуемое раскрытие (вертикальное и горизонтальное) в различных условиях эксплуатации;

– целенаправленно усиливать критические узлы конструкции, предотвращая их разрушение, и облегчать менее нагруженные элементы, что снижает общую массу и стоимость орудия лова;

– разрабатывать селективные модификации тралов, направленные на снижение прилова нецелевых видов гидробионтов.

Расчет силовых и пространственно-временных характеристик трала позволит:

– оптимально проектировать и размещать промысловое оборудование: подбирать мощность и расположение траловых лебедок, определять конструкцию кормового слипа, усиление элементов корпуса в зонах высоких нагрузок;

– проводить комплексный анализ «судно-трал» как единой системы, что необходимо для достижения максимальной энергоэффективности и промысловой производительности судна;

– обеспечивать безопасность эксплуатации, рассчитывая реальные нагрузки на такелаж и конструкцию судна при работе с тяжелыми орудиями лова.

Таким образом, исследование обеспечивает научно-технический задел для инновационного развития всего рыбопромыслового комплекса – от проектирования конкретных орудий лова до создания высокотехнологичных судов и подготовки кадров.

Список источников

1. Недоступ, А. А. Методы расчета сетных пассивных орудий внутреннего и прибрежного рыболовства: моногр. / А. А. Недоступ. – Калининградский гос. тех. ун-т. – Калининград, 2010. – 281 с. – ISBN 978-5-94826-291-8.

2. Ferziger, J. H. Computational Methods for Fluid Dynamics / J. H. Ferziger, M. Perić, R. L. Street. – 4th ed. – Springer, 2020. – 596 p.

3. Филатов, Е. Ю. Численное моделирование в гидродинамике: современные методы и приложения / Е. Ю. Филатов, Ф. Н. Ясинский. Труды Академии наук. Серия: физико-технические проблемы энергетики. – 2008. – № 4. – С. 15–28.

4. Strang, G. Introduction to Applied Mathematics / G. Strang, G. J. Fix. – Vol. 2. – Wellesley-Cambridge Press, 1986. – 758 p.

5. Тихонов, А. Н. Однородные разностные схемы / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1961. – Т. 1, № 1. – С. 5–63.

6. Golub, G. H. Matrix Computations / G. H. Golub, C. F. Van Loan. – 4th ed. – JHU Press, 2013. – 784 p. – ISBN 0-8018-5413-X.

7. Kirk, D. B. Programming Massively Parallel Processors: A Hands-on Approach / D. B. Kirk, W. W. Hwu. – 3rd ed. – Morgan Kaufmann, 2016. – 550 p.

8. Коновалова, К. В. Оценка сопротивления траловых мешков с делью Т0, Т90 / К. В. Коновалова. – DOI: 10.24143/2073-5529-2025-1-102-111 // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. – 2025. – № 1. – С. 102–111.

References

1. Nedostup, A. A. Methods for calculating netting passive gears for inland and coastal fisheries: monographs / A. A. Nedostup. – Kaliningrad State Technical University. – Kaliningrad, 2010. – 281 p. – ISBN 978-5-94826-291-8.

2. Ferziger, J. H. Computational Methods for Fluid Dynamics / J. H. Ferziger, M. Perić, R. L. Street. – 4th ed. – Springer, 2020. – 596 p.

3. Filatov, E. Y. Numerical modeling in hydrodynamics: modern methods and applications / E. Y. Filatov, F. N. Yasinsky // Proceedings of the Academy of Sciences. Series: physical and technical problems of energetics. – 2008. – № 4. – P. 15–28.

4. Strang, G. Introduction to Applied Mathematics / G. Strang, G. J. Fix. – Vol. 2. – Wellesley-Cambridge Press, 1986. – 758 p.

5. Tikhonov, A. N. Homogeneous difference schemes / A. N. Tikhonov, A. A. Samarsky // Journal of computational mathematics and mathematical physics. – 1961. – Vol. 1, № 1. – P. 5–63.

6. Golub, G. H. Matrix Computations / G. H. Golub, C. F. Van Loan. – 4th ed. – JHU Press, 2013. – 784 p. – ISBN 0-8018-5413-X.

7. Kirk, D. B. Programming Massively Parallel Processors: A Hands-on Approach / D. B. Kirk, W. W. Hwu. – 3rd ed. – Morgan Kaufmann, 2016. – 550 p.

8. Konovalova, K. V. Assessment of resistance of trawl cod-ends with netting T0, T90 / K. V. Konovalova. – DOI: 10.24143/2073-5529-2025-1-102-111 // Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Fisheries. – 2025. – № 1. – P. 102–111.

Информация об авторах

А. О. Ражев – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник
А. А. Недоступ – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой промышленного рыболовства
П. В. Насенков – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры промышленного рыболовства
К. В. Коновалова – кандидат технических наук, ведущий инженер кафедры промышленного рыболовства

Information about the authors

A.O. Razhev – Candidate of Technical Sciences, Leading Research Fellow
A. A. Nedostup – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Commercial Fisheries
P. V. Nasenkov – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Commercial Fisheries
K. V. Konovalova – Candidate of Technical Sciences, Leading Engineer of the Department of Commercial Fisheries

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 17.10.2025; одобрена после рецензирования; принята к публикации

The article was submitted 17.10.2025; approved after reviewing; accepted for publication