УДК 639.2/.3:51-7; 639.2/.3:007;
ГРНТИ 69.01.77

Моделирование гидромеханики сетной инженерной конструкции в условиях гидроподпора с учетом ее жесткостных характеристик

[1]Ражев Алексей Олегович, канд. тех. наук;
[2]Недоступ Александр Алексеевич, канд. тех. наук, доцент;
[3]Насенков Павел Владимирович;
[4]Коновалова Карина Витальевна;

[1,2,3,4]ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет», Калининград, Россия, e-mail: [1]aleksej.razhev@klgtu.ru, [2]nedostup@klgtu.ru, [3]pavel.nasenkov@klgtu.ru, [4]karina.konovalova@klgtu.ru

Аннотация. *В статье представлена математическая модель для оценки влияния ориентации ячеи по отношению к потоку жидкости в осесимметричных сетных инженерных конструкциях в условиях гидроподпора на форму и нагрузки в конструкции на примере тралового мешка с уловом. Новизной исследования является сведение задачи к расчету в двухмерной системе координат, что уменьшит трудоемкость вычислений и ускорит процесс моделирования и получения результата. Приведен результат численного моделирования на разработанной программе для ЭВМ, согласующийся с результатами, полученными при натурном эксперименте. Обозначены области применения результатов исследования.*

Ключевые слова: *сетная инженерная конструкция, гидромеханика, гидродинамика, траловый мешок, математическая, имитационная модель, гидроподпор*

Введение

Сетные инженерные конструкции широко применяются в различных отраслях, в том числе в промышленном рыболовстве и рыбоводстве. Такие орудия рыболовства, как тралы, представляют собой сложную конструкцию, состоящую из различных частей: канатной, сетной, тралового мешка. В процессе работы трал с уловом двигается в потоке воды. Гидромеханика трала определяется влиянием на него внешних воздействий в виде потока воды и накапливающегося в траловом мешке улова.

Эффективность тралового лова и качество улова во многом зависят от формы тралового мешка, которая в свою очередь зависит от условий траления и степени внешнего воздействия в виде накапливающегося улова. В процессе тралового лова возникает проблема, вызванная влиянием гидроподпора на форму тралового мешка. При увеличении скорости траления и объема улова увеличиваются радиальные силы сжатия тралового мешка, что приводит к уменьшению площади поперечного сечения и увеличению длины зоны прохода рыбы. Проблема частично решается изменением ориентации ячей мешка с Т0 на Т90 (см. рис. 1).

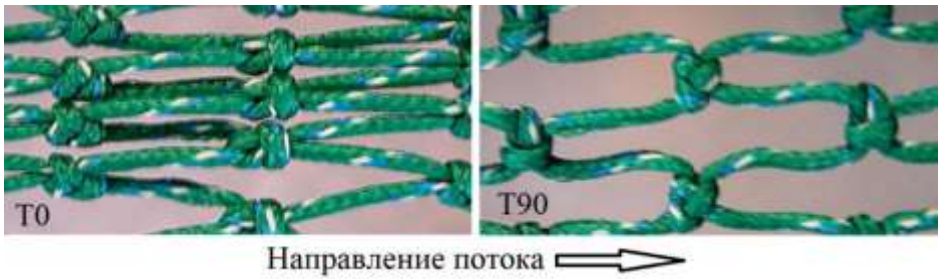

Рис. 1. Ориентация ячеи

Установлено, что при ориентации ячеи тралового мешка Т90 из-за увеличения площади зоны прохода рыбы тот же трал имеет улучшенную селективность, вылавливает более крупную рыбу [1]. При этом рыба меньше травмируется, что улучшает качество улова.

На рис. 2 и 3 показан вид тралового мешка с имитацией улова в гидроканале при различной ориентации ячеи к потоку воды. Материал веревок и диаметр тралового мешка, шаг ячеи и количество ячей по длине и окружности тралового мешка, а также скорость потока и объем улова в обоих случаях одинаковы.

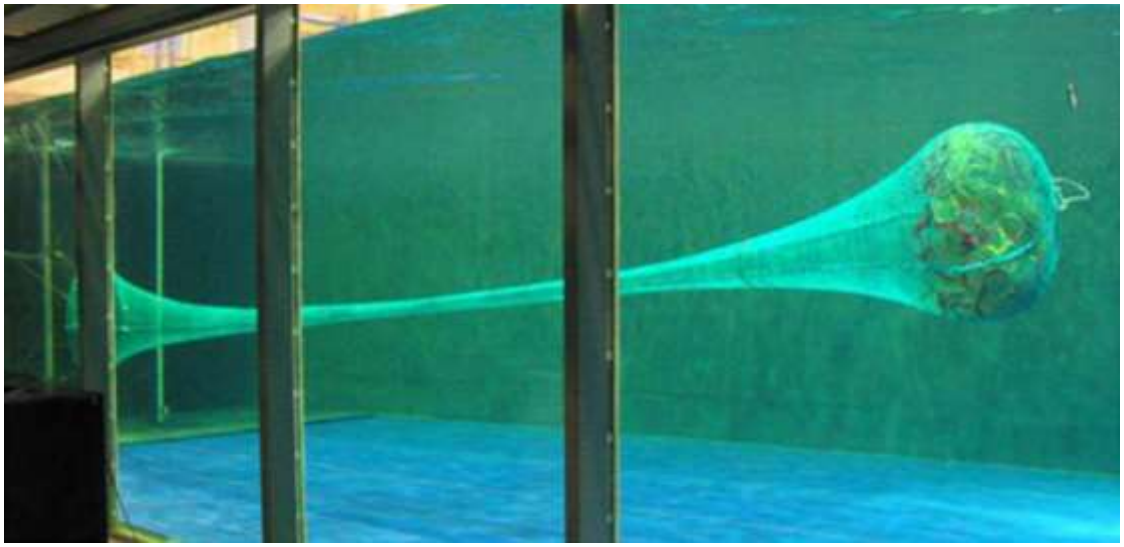

Рис. 2. Траловый мешок с уловом при ориентации ячей Т0

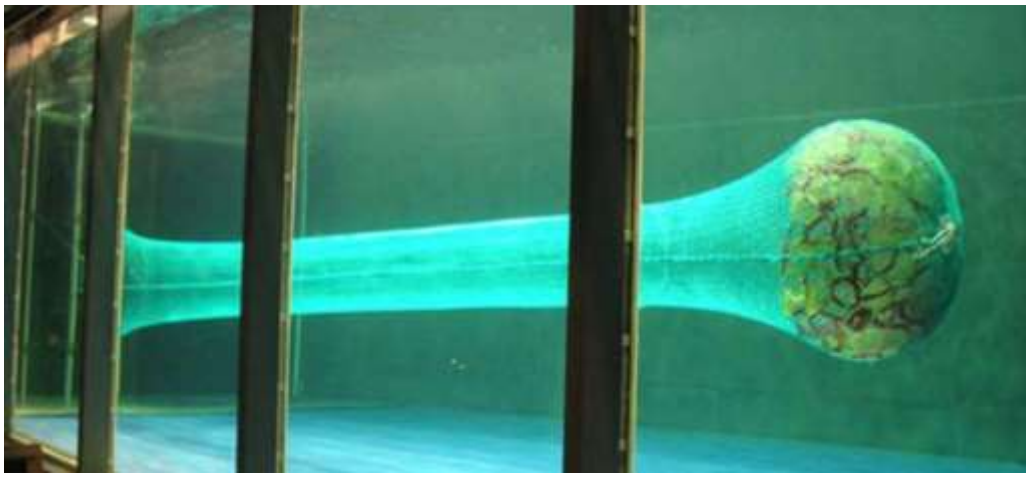

Рис. 3. Траловый мешок с уловом при ориентации ячей Т0

По рис. 2 и 3 видно, что при ориентации ячеи Т90 зона прохода шире, чем при ориентации Т0.

Постановка задачи

Оценку влияния ориентации ячеи по отношению к потоку жидкости в сетных инженерных конструкциях на форму конструкции можно проводить экспериментально, что требует наличия гидроканала и сложного измерительного оборудования, много времени для подготовки и проведения натурных и модельных экспериментов. Численный эксперимент позволяет значительно ускорить и удешевить процесс оценки.

Для проведения численного эксперимента необходимо программное обеспечение, для разработки которого требуется математическая и имитационная модель поведения сетной конструкции в потоке жидкости под действием внешних факторов. По выходным данным, полученными в

процессе моделирования, должно быть возможно определить форму сетной конструкции и нагрузки в ее элементах как в числовом, так и в графическом (2-D, 3-D) представлениях.

Поставим задачу определения указанных характеристик посредством математического моделирования сетной инженерной конструкции на примере тралового мешка с различной ориентацией ячей. Для оценки влияния гидроподпора на форму тралового мешка с уловом, определения длины и размеров места сужения, траловый мешок можно считать осесимметричной сетной конструкцией с гибкими элементами, обладающими заданной степенью жесткости. При условии, что плотность элементов сетной конструкции и улова близка к плотности жидкости, в которую погружена конструкция с уловом (справедливо для тралового мешка), силы гидродинамического сопротивления будут многократно превышать гидростатические.

При данной постановке гидростатическими силами можно пренебречь, а задачу свести к расчету в двухмерной системе координат, что уменьшит трудоемкость вычислений и ускорит процесс моделирования и получения результата.

С учетом вышесказанного, с использованием уже имеющегося задела [2, 3], авторами была разработана математическая модель осесимметричной сетной инженерной конструкции на примере тралового мешка.

Материалы и методы

Введем расчетную декартову систему координат *Oxy*. Ось *Ox* направим влево вдоль оси симметрии сетной конструкции, ось *Oy* от оси симметрии вверх. Пронумеруем ряды узлов в направлении оси *Ox*: $i = [0\ldots 2m]$, где i – порядковый номер ряда; m – количество ячей вдоль оси сетной конструкции. Зафиксируем узлы ряда $i = 0$ в начале системы координат и установим радиус левого ряда:

$$x_0 = 0,\ \ y_0 = 0,\ \ y_{2m} = D/2, \tag{1}$$

где D – диаметр левого ряда.

Для каждого ряда i, кроме последнего, составим зависимости, связывающие геометрические характеристики сетной конструкции (см. рис. 4):

$$l_i = \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2},\ \ \Delta x_i = x_{i+1} - x_i,\ \ \Delta y_i = y_{i+1}\cos\frac{\pi}{n} - y_i, \tag{2}$$

где l_i – расстояние между узлами сети в плоскости *Oxy*; Δx_i, Δy_i – проекции l_i на оси координат; n – количество ячей вдоль окружности сетной конструкции.

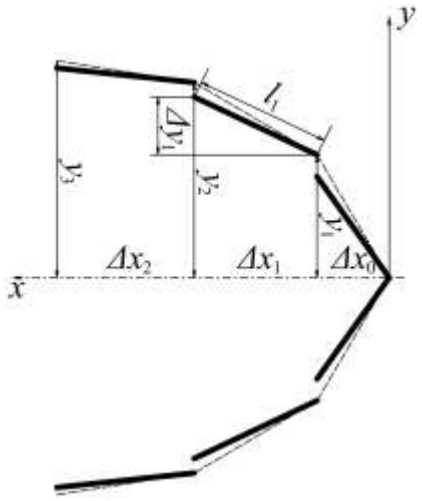

Рис. 4. Проекция части сетной конструкции в расчетной плоскости

Рассмотрим расчетные схемы одного ряда ячеи при различной ее ориентации (см. рис. 5).

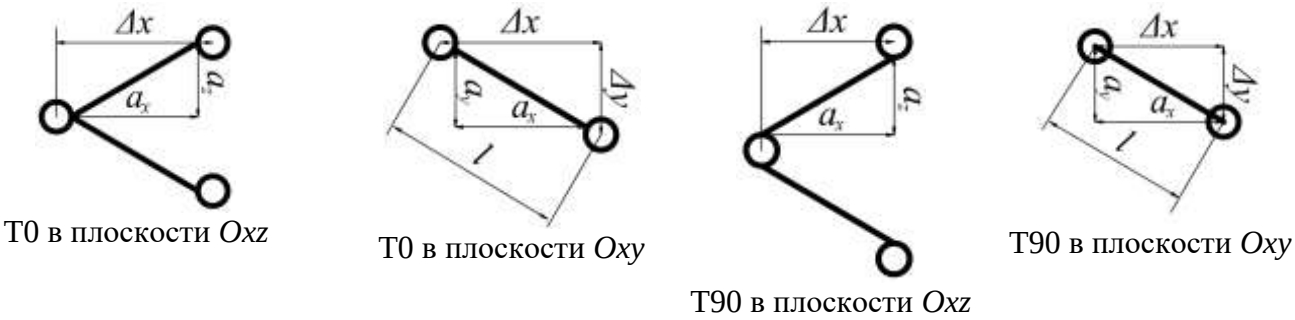

Рис. 5. расчетные схемы одного ряда ячеи

Будем считать узлы сети абсолютно жесткими, а веревки, соединяющие узлы (стороны ячеи), прямыми и растяжимыми по закону Гука. Под действием силы растяжения длина веревки a_i между рядами i и i+1 определяется как

$$a_i = \left(a_0 - d_n\right)\left(1 + \frac{4T_i}{\pi E d^2}\right), \tag{3}$$

где a_0 – шаг ячеи; d_n – диаметр узла; T_i – сила натяжения веревки; E – модуль упругости веревки; d – диаметр веревки.

Для каждого ряда i, кроме последнего $i = 2m$, составим зависимости, связывающие длину веревки и диаметр узла с геометрией ячеи. Свяжем длину веревки с ее проекциями на оси ортогональной системы координат $Oxyz$, оси Ox и Oy которой совпадают с одноименными осями расчетной системы координат Oxy:

$$a_i = \sqrt{a_{xi}^2 + a_{yi}^2 + a_{zi}^2}\ . \tag{4}$$

Для ориентации T0 получаем

$$d_{nxi} = d_n \Delta x_i / l_i,\ \ d_{nyi} = d_n \Delta y_i / l_i, \tag{5}$$

$$a_{xi} = \Delta x_i - d_{nxi},\ \ a_{yi} = \Delta y_i - d_{nyi}, \tag{6}$$

$$a_{zi} = \frac{1}{2}\left(y_i + y_{i+1}\right)\sin\frac{\pi}{n}, \tag{7}$$

где d_n – диаметр узла сети; d_{nx}, d_{ny} – проекции узла на оси координат; a_{xi}, a_{yi}, a_{zi} – проекции веревки на оси координат.

Для ориентации T90 получаем

$$a_{xi} = \Delta x_i,\ \ a_{yi} = \Delta y_i,\ \ a_{zi} = \frac{1}{2}\left(y_i + y_{i+1}\right)\sin\frac{\pi}{n} - d_n \cos\frac{\pi}{n}. \tag{8}$$

Рассмотрим установившейся режим при постоянной скорости течения потока жидкости, направленного противоположно направлению оси Ox. Под действием потока жидкости и внешнего воздействия (улова) на сетную конструкцию действуют внешние силы. В установившемся режиме внешние силы уравновешиваются внутренними силами напряжения в элементах сетной конструкции так, что суммарная сила в любой точке конструкции равна 0.

В расчетной схеме считаем, что все силы приложены только к узлам сети. При этом внешние силы, приложенные к веревке, распределены поровну между двумя смежными узлами. Внут-

ренние силы вызваны только растяжением веревок, являясь силами натяжения T_i, приложенными к смежным узлам с противоположным знаком.

Для каждого ряда i, кроме последнего, запишем уравнения, связывающие силовые и геометрические характеристики ряда. При этом учтем, что на узел действуют силы от четырех веревок, попарно для каждого ряда. Для первого ряда $i = 0$ получаем

$$2T_0\Delta x_0 / l_0 - R_{x0} + F_{x0} = 0,\ \ 2T_0\Delta y_0 / l_0 + R_{y0} + F_{y0} = 0. \tag{9}$$

Для остальных рядов

$$\begin{aligned} &2T_i\Delta x_i / l_i - 2T_{i-1}\Delta x_{i-1} / l_{i-1} - R_{xi} - R_{xi-1} + F_{xi} + F_{xi-1} = 0, \\ &2T_i\Delta y_i / l_i - 2T_{i-1}\Delta y_{i-1} / l_{i-1} + R_{yi} + R_{yi-1} + F_{yi} + F_{yi-1} = 0, \end{aligned} \tag{10}$$

где R_x (индекс опускаем) – гидродинамическая сила лобового сопротивления, действующая на веревку и половину узла; R_y – гидродинамическая распорная сила, действующая на веревку и половину узла; F_x, F_y – проекции силы внешнего воздействия, вызванной давлением улова.

Для вычисления гидродинамических сил существуют различные методы. Более точный, но более трудоемкий с точки зрения вычислительных затрат метод заключается в численном решении систем дифференциальных уравнений гидродинамики Навье-Стокса. При этом для двумерной постановки задачи можно применять метод вихрь-функция тока. Более простым, но менее точным методом, приемлемым для оценочных расчетов, является метод приближенного вычисление гидродинамических сил, основанный на эмпирических зависимостях, выведенных для сети [3]:

$$R_x = c_x \frac{\rho v^2}{2} F_{\text{Н}},\ \ R_y = c_y \frac{\rho v^2}{2} F_{\text{Н}}, \tag{11}$$

$$c_x = c_0 + \left(c_{90} - c_0\right)\left|\Delta y / l\right|,\ \ c_y = c_{90}\Delta x\Delta y / l^2, \tag{12}$$

$$c_0 = F_O \operatorname{Re}^{-0,165},\ \ c_{90} = 16\left(2F_O / \operatorname{Re}\right)^{0,28}, \tag{13}$$

$$F_{\text{Н}} = da_0 + \pi d_n^2 / 8, \tag{14}$$

$$\operatorname{Re} = dv / \upsilon, \tag{15}$$

$$F_O = \frac{d}{a_0}\frac{1}{u_x u_y}, \tag{16}$$

$$u_x = \frac{y}{a_0}\sin\frac{\pi}{n},\ u_y = \sqrt{1 - u_x}, \tag{17}$$

где 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; $F_{\text{Н}}$ – площадь сечения веревки и половины узла; F_O – сплошность ячеи; Re – число Рейнольдса; v – скорость потока жидкости; υ – кинематическая вязкость жидкости; u_x, u_y – посадочные коэффициенты ячеи по длине и окружности сетной конструкции соответственно.

В описанных выше зависимостях (11) – (17) индекс ряда i опущен для простоты изложения.

Рассмотрим внешнее воздействие на сетную конструкцию на примере улова в траловом мешке. Проведем оценочное влияние улова заданного объема на геометрию тралового мешка. Будем считать, что весь улов находится в начале мешка (начиная от ряда $i = 0$), плотность улова по-

стоянна по всему его объему и примерно равна плотности воды. Таким образом весом улова в воде мы пренебрегаем. При расчете гидродинамики улова будем считать, что форма улова является полусферой, обращенной вогнутой частью навстречу потоку жидкости, улов обладает свойствами жидкости, а давление внутри него распределено равномерно.

На полусферу со стороны жидкости действует давление

$$P = c_{хк} \frac{\rho v^2}{2}, \tag{18}$$

где $c_{хк}$ – гидродинамический коэффициент сопротивления улова. Для полусферы, обращенной вогнутой частью навстречу потоку жидкости, коэффициент сопротивления близок к коэффициенту сопротивления диска и находится в диапазоне от 1,17 до 1,42. В приближенных расчетах, а у нас оценочный расчет влияния улова, $c_{хк}$ = 1,2 [4, 5].

Запишем уравнение, связывающее объем улова с его уровнем в траловом мешке:

$$V = \sum_{i=0}^{k-1} V_i + V_p, \tag{19}$$

при

$$V_i = \frac{1}{3}\left(S_i + \sqrt{S_i S_{i+1}} + S_{i+1}\right)\Delta x_i, \;\; V_p = \frac{1}{3}\left(S_p + \sqrt{S_p S_k} + S_k\right)\left(x_p - x_k\right), \tag{20}$$

где V – объем улова; V_i – объем ряда i; V_p – объем улова в последнем заполненном ряде $i = k$; S_i, S_{i-1}, S_k – площади сечения i-го, i-1 и k-го ряда соответственно; S_p – площадь сечения ряда на уровне улова x_p.

Для расчета объема ряда использована формула расчета объема правильной усеченной пирамиды [6]. Площади сечений определяются по формуле расчета площади вписанного правильного многоугольника:

$$S_i = \frac{n}{2} y_i^2 \sin\frac{2\pi}{n}, \;\; S_p = \frac{n}{2} y_p^2 \sin\frac{2\pi}{n}, \;\; y_p = \left(x_p - x_k\right)\frac{\Delta y_k}{\Delta x_k} + y_k, \tag{21}$$

где y_p – радиус ряда на уровне улова x_p.

Вычислим силы внешнего воздействия, вызванные давлением улова. Площадь ряда i, приходящаяся на одну веревку

$$s_i = \frac{1}{2} l_i \left(y_i + y_{i+1}\right)\sin\frac{\pi}{n}. \tag{22}$$

Для ряда i = 0

$$F_{x0} = P s_0 \frac{\Delta x_0}{l_0}, \;\; F_{y0} = 0. \tag{23}$$

Для рядов i = [1…k-1]

$$F_{xi} = \frac{1}{2} P\left(s_i \frac{\Delta x_i}{l_i} + s_{i-1}\frac{\Delta x_{i-1}}{l_{i-1}}\right), \;\; F_{yi} = \frac{1}{2} P\left(s_i \frac{\Delta y_i}{l_i} + s_{i-1}\frac{\Delta y_{i-1}}{l_{i-1}}\right), \tag{24}$$

Для ряда $i = k$

$$F_{xi} = \frac{1}{2} P \left(s_p \frac{\Delta x_k}{l_k} + s_{k-1} \frac{\Delta x_{k-1}}{l_{k-1}} \right), \quad F_{yi} = \frac{1}{2} P \left(s_p \frac{\Delta y_k}{l_k} + s_{k-1} \frac{\Delta y_{k-1}}{l_{k-1}} \right), \tag{25}$$

$$s_p = \frac{1}{2} l_k \frac{x_p}{x_k} \left(2y_k + \Delta y_k \frac{x_p}{x_k} \right) \sin \frac{\pi}{n}, \tag{26}$$

где s_p – часть площади ряда k до уровня улова, приходящаяся на одну веревку.

Для рядов $i = [k+1 \ldots 2m-1]$ без улова

$$F_{xi} = 0, \; F_{yi} = 0. \tag{27}$$

Подставив (26), (22) и (18) в (25), (22) и (18) в (24) и (23), (27), (25), (24) и (23) в (9) и (10), (21) в (20), (20) в (19), (17) в (16), (16) и (15) в (13), (14) и (12) в (11), (11) в (9) и (10), (5) в (6), (6) и (7), или (8) в зависимости от ориентации ячеи в (4), и приравняв правые части (3) и (4) с учетом (1) и (2) мы получим $6m$ уравнений с $6m$ неизвестными $x_1,\ldots,x_{2m}$, $y_1,\ldots,y_{2m-1}$, $T_0,\ldots,T_{2m-1}$, x_p.

Разрешив полученную систему уравнений относительно неизвестных любым численным методом оптимизации, например методом Левенберга-Марквардта при начальных приближениях неизвестных

$$x_i = i\sqrt{a_0^2 - \frac{D^2}{4}\sin^2\frac{\pi}{n}}, \; y_i = \frac{D}{4m} i, \; T_i = 0,$$

мы решим поставленную задачу.

Результаты и их обсуждение

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.

Для численного эксперимента был взят траловый мешок со следующими конструктивными характеристиками: m = 20; n = 10; D = 50 мм; d = 2 мм; $k_у$ = 3; E = 1,1 ГПа. Параметры внешнего воздействия: v = 2 м/с; ρ = 1030 кг/м^3; υ = 1,004 мм^2/с; V = 500 см^3. При задании диаметра узла используется коэффициент утолщения узла $k_у = d_n / d$.

Результаты работы программы представлены на рис. 6 и 7.

По результатам моделирования видно (на рис. 4 и 5 выделены рамкой и стрелками), что минимальный диаметр тралового мешка при ориентации ячеи Т0 составляет 21,6 мм, что меньше диаметра при Т90, равного 29,0 мм. При этом длина зоны сужения визуально для Т90 меньше, чем для Т0. Таким образом результаты, полученные при помощи численного моделирования по разработанной авторами математической модели, согласуются с результатами, полученными при натурном эксперименте в гидроканале (см. рис. 2 и 3).

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

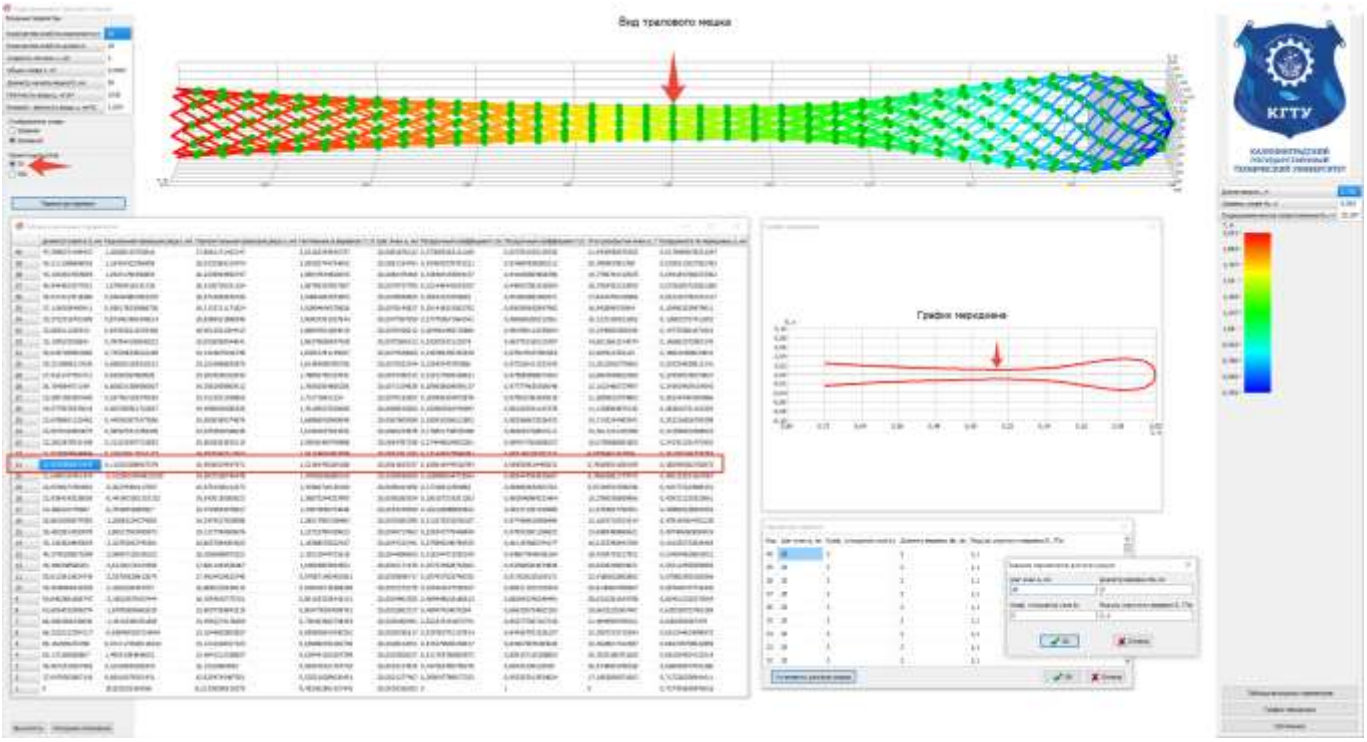

Рис. 6. Численное моделирование тралового мешка с ориентацией ячеи Т0

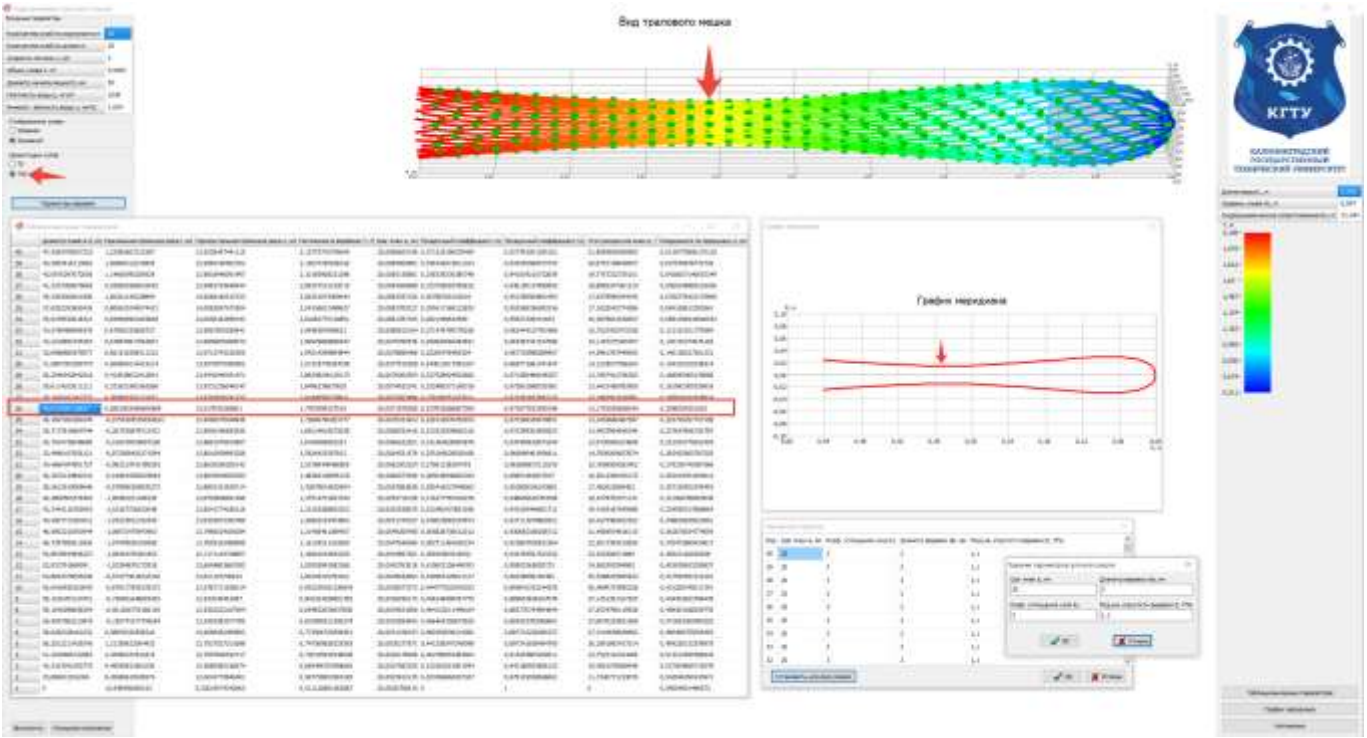

Рис. 7. Численное моделирование тралового мешка с ориентацией ячеи Т90

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/.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических 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.

Modeling of the hydromechanics of a grid engineering structure under hydraulic support conditions, taking into account its rigidity characteristics

[1]Razhev Aleksej Olegovich, Candidate of Technical Sciences
[2]Nedostup Alexander Alekseevich, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor
[3]Nasenkov Pavel Vladimirovich
[4]Konovalova Karina Vitalievna

[1,2,3,4]Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia, e-mail:
[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 model for evaluating the effect of mesh orientation with respect to fluid flow in axisymmetric mesh engineering structures under hydraulic support conditions on the shape and loads in the structure using the example of a trawl codend with a catch. 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 modeling and obtaining results. The result of numerical simulation on the developed computer program is presented, consistent with the results obtained in a field experiment. The areas of application of the research results are outlined.*

Keywords*: grid engineering structure, hydromechanics, hydrodynamics, trawl codend, mathematical, simulation model, hydraulic support*