

Научная статья

УДК 532.3, 519.6

doi: 10.17223/19988621/81/12

Инженерный расчет разноглубинного рыболовного трала

Алексей Олегович Ражев¹, Александр Алексеевич Недоступ²

^{1,2} *Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия*

¹ *aleksej.razhev@klgtu.ru*

² *nedostup@klgtu.ru*

Аннотация. Приводится метод расчета силовых и геометрических характеристик разноглубинного рыболовного трала, состоящего из гибких нитевидных элементов канатной и сетной частей, связанных между собой и с твердотельными элементами оснастки, основанный на методе конечных элементов. Рассмотрена реализация метода на графическом процессоре ЭВМ в составе системы автоматизированного проектирования орудий промышленного рыболовства. Приведены результаты работы системы при расчете физической модели трала в виде числовых показателей скорости вычислений, объема требуемой памяти, точности вычислений, их сравнительный анализ с результатами экспериментов в гидроканале с той же моделью.

Ключевые слова: математическая модель, имитация, расчет, графический процессор, рыболовный трал

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

Для цитирования: Ражев А.О., Недоступ А.А. Инженерный расчет разноглубинного рыболовного трала // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2023. № 81. С. 133–148. doi: 10.17223/19988621/81/12

Original article

Engineering calculation of a midwater fishing trawl

Aleksey O. Razhev¹, Aleksandr A. Nedostup²

^{1,2} *Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russian Federation*

¹ *aleksej.razhev@klgtu.ru*

² *nedostup@klgtu.ru*

Abstract. This paper presents a method for calculating the power and geometric properties of a midwater fishing trawl, which is a complicated engineering structure made up of tied flexible (threads, ropes, flap) and rigid (rigging, trawl boards) elements. A computational

model, the functional relations for internal forces and geometric characteristics of the trawl, and a calculation procedure based on the finite element method are proposed. The computational algorithm is implemented on a graphics processing unit of a personal computer with the use of DirectCompute, Shader Model 5, and high-level shader language. The performance and resource intensity of the algorithm applied in the computer-aided design system for industrial fishing gear are assessed in terms of the number of trawl nodes and computing equipment. A comparative analysis of the calculated and experimentally obtained characteristics of the trawl physical model is presented. According to the results, the computational error in geometric characteristics and internal forces is less than 3 and 5%, respectively.

Keywords: mathematical model, simulation, calculation, graphics processing unit, fishing trawl

Acknowledgments: The research was carried out within the state assignment “Development of Physical, Mathematical, and Predictive Models of the Bottom and Midwater Trawl System Operation”.

For citation: Razhev, A.O., Nedostup, A.A. (2023) Engineering calculation of a midwater fishing trawl. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 81. pp. 133–148. doi: 10.17223/19988621/81/12

Введение

Рыболовный трал представляет собой сложное инженерное сооружение, состоящее из канатно-сетной части, сетевого мешка и элементов оснастки (твердотельных и гибких). Канатно-сетная часть и сетной мешок являются канатно-веревочными изделиями (КВИ), основу которых составляют соединенные между собой гибкие нитевидные элементы (нитки, веревки, канаты и др.). К твердотельным элементам относятся траловые доски, которые выполняют функцию обеспечения горизонтального раскрытия устья трала, кухтыли, скобы, вертлюги и др. К твердотельным элементам также можно отнести места соединения нитевидных элементов – узлы.

На этапе проектирования инженеру и конструктору необходимо оперативно оценивать форму трала при различных его конструктивных характеристиках, различных характеристиках материалов и условиях эксплуатации с целью оптимального подбора. В процессе эксплуатации рыбодобытчикам необходимо подбирать элементы оснастки орудия лова, выполнять их регулировку с учетом условий предстоящего лова. Настройка трала в процессе эксплуатации влияет на глубину траления, раскрытие трала, его селективность.

Разрабатываемая система автоматизированного проектирования орудий промышленного рыболовства (САПР-ОР) предназначена для проектирования рыболовного трала, трехмерной визуализации его формы под действием различных гидростатических (веса в воде или плавучести) и гидродинамических (вызванных обтеканием элементов трала водой в процессе траления) сил, расчета нагрузок на элементы трала [1, 2]. В процессе разработки были созданы математические и имитационные модели с эффективным задействованием современных вычислительных ресурсов персонального компьютера.

Материалы и методы

Основой математической модели является метод точечных масс [3], представляющий разновидность метода конечных элементов (МКЭ) [4–6]. В методе точечных масс используется конечный элемент – упругий стержень, имеющий два узла и одну связь. Элемент определяет зависимость между длиной связи (расстоянием между узлами) и силой реакции связи (силой натяжения в гибком элементе, силой противодействия изгибу).

Анализ формы трала и нагрузок в его элементах в процессе траления проводится при заданных внешних условиях (заданной скорости траления). В таких условиях постановку задачи можно свести к статической.

Для корректного отображения мест соединения нитевидных элементов необходимо учитывать их изгибную жесткость вблизи узлов, иначе переход от нитевидного элемента к узлу будет неплавным и визуально заметным. В расчетной схеме методом точечных масс нитевидный элемент представим в виде цепной линии, состоящей из n узлов (точечных масс) и связей, описывающих взаимодействие между узлами. Для каждого узла расчетной схемы введем дополнительную связь, характеризующую реакцию на изгиб. Расположим узлы равноудаленно друг от друга по всей длине элемента. На рис. 1 показаны участок нитевидного элемента, включающий три соседних узла $i, j = i + 1, k = i + 2$ (точками обозначены узлы, линиями – связи), и силы, действующие на узел j .

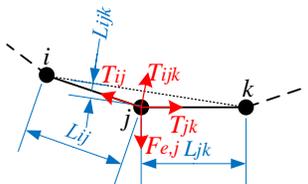


Рис. 1. Расчетная схема нитевидного элемента
Fig. 1. Calculation scheme of a thread-like element

На рис. 1 используются следующие обозначения: L_{ij} – длина участка ij , L_{jk} – длина участка jk после деформации; T_{ij} , T_{jk} – силы натяжения (положительная при растяжении, отрицательная при сжатии) участка ij и jk соответственно; T_{ijk} – сила противодействия изгибу в узле j ; $F_{e,j}$ – сумма внешних сил, приложенных к узлу j .

Для каждого узла введем весовой коэффициент. Для свободных (незакрепленных) узлов зададим

$$w = \frac{L_B}{2G},$$

где w – весовой коэффициент для узла; L_B – длина элемента в ненагруженном состоянии; G – вес элемента в воде (либо плавучесть со знаком минус). Для фиксированных узлов (точек крепления ваеров на судне) зададим $w = 0$.

Для учета внешних сил для каждого узла i запишем в дифференциальной векторной форме зависимость, связывающую узловое перемещение с изменением внешней силы (гидростатической и гидродинамической):

$$\frac{d\mathbf{r}_i}{d\mathbf{F}_{e,i}} = w_i, \quad (1)$$

где \mathbf{r}_i – положение узла в пространстве; $\mathbf{F}_{e,i}$ – сумма внешних сил, приложенных к узлу.

Для учета внутренних сил натяжения для каждой пары соседних узлов i и j запишем дифференциальные уравнения, связывающие удлинение с силой натяжения:

$$\frac{d\mathbf{r}_i}{d\mathbf{F}_{ij}} = w_i, \quad \frac{d\mathbf{r}_j}{d\mathbf{F}_{ij}} = -w_j, \quad d\mathbf{F}_{ij} = \frac{2dT_{ij}}{L_{ij}}(\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i), \quad (2)$$

при

$$dT_{ij} = \frac{L_{ij} - L_0 (1 + 4T_{ij} / (\pi d^2 E_x))}{2(w_i + w_j)}$$

и начальных условиях для всех узлов $\mathbf{r} = \mathbf{r}_0$ для всех связей $T_{ij} = 0$, где \mathbf{F}_{ij} – вектор внутренней силы натяжения участка ij , направленный от узла i к узлу j ; L_0 – длина участка в ненагруженном состоянии. Для учета внутренних сил противодействия изгибу для каждых трех соседних узлов i, j и k запишем дифференциальные уравнения, связывающие деформацию изгиба с силой противодействия изгибу:

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{r}_i}{d\mathbf{F}_i} = w_i, \quad \frac{d\mathbf{r}_j}{d\mathbf{F}_j} = w_j, \quad \frac{d\mathbf{r}_k}{d\mathbf{F}_k} = w_k, \\ d\mathbf{F}_i = -\frac{dT_{ijk}}{L_{ij}^2 L_{jk}}(\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i) \times (\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_j) \times (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i), \\ d\mathbf{F}_k = -\frac{dT_{ijk}}{L_{ij}^2 L_{jk}}(\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i) \times (\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_j) \times (\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_j), \\ -d\mathbf{F}_j = d\mathbf{F}_i + d\mathbf{F}_k, \end{aligned} \quad (3)$$

при

$$\begin{aligned} dT_{ijk} = \frac{L_{ijk} - T_{ijk} L_0^3 / (48E_y J)}{w_i + w_j + w_k}, \\ 2L_{ijk} = \|\mathbf{r}_i + \mathbf{r}_k - 2\mathbf{r}_j\| \end{aligned} \quad (4)$$

и начальных условиях для всех узлов $\mathbf{r} = \mathbf{r}_0$ для всех связей $T_{ijk} = 0$, где $\mathbf{F}_i, \mathbf{F}_j, \mathbf{F}_k$ – векторы внутренних сил противодействия изгибу, приложенных к узлам i, j, k соответственно; $E_y J$ – изгибная жесткость элемента. В уравнении (4) двойными вертикальными скобками обозначается оператор взятия абсолютного значения.

Рассмотрим численный метод решения уравнений (1)–(3) итерационным методом последовательного приближения. Алгоритм решения состоит из двух вложенных циклов. Во внешнем цикле вычисляются узловые перемещения под действием внешних сил, во внутреннем – внутренних. При переходе к конечно-разностной схеме произведем замены:

$$d\mathbf{r} = \mathbf{r}^{[i+1]} - \mathbf{r}^{[i]}, \quad dT = T^{[i+1]} - T^{[i]},$$

где $[i]$ – номер итерации.

Условие завершения итерационного процесса во внутреннем цикле – достижение заданной минимальной невязки по всем перемещениям

$$dr < \varepsilon_L L_0,$$

во внешнем цикле – равнодействующая сила, приложенная к каждому узлу, меньше заданной минимальной невязки по внешним силам

$$\left\| \mathbf{F}_{e,j} + T_{ij} \frac{\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j}{L_{ij}} + T_{jk} \frac{\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_j}{L_{jk}} \right\| < \varepsilon_F F_{e,j},$$

где ε_L – заданная погрешность по геометрическим характеристикам; ε_F – заданная погрешность по силовым характеристикам.

При статической постановке исследуется установившийся режим; кинематика твердотельных элементов не учитывается. Для определения сил, действующих на привязанные к твердотельным элементам узлы математической модели КВИ, учитываются моменты и силы относительно их центра масс в установившемся режиме (без учета скорости и ускорения вращения элемента относительно его центра масс и при нулевой скорости перемещения элемента относительно трала). Таким образом, силы гидродинамического сопротивления при статической постановке задачи зависят только от скорости потока воды относительно твердотельного элемента (скорости течения) и ориентации элемента (углов Эйлера) [7] относительно вектора скорости потока воды.

Для расчета сил гидродинамического сопротивления твердотельных элементов произвольной формы в точках соединения с гибкими элементами необходимо учитывать поле давлений на поверхности твердотельного элемента при заданных скоростях потока и ориентации элемента относительно потока. Данная задача решается неявным численным методом решения систем дифференциальных уравнений гидродинамики в частных производных (уравнений Навье–Стокса) с применением линеаризации, метода покоординатного расщепления на трехмерной пространственной сетке и последующим решением трехдиагональных систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) методом прогонки во внутренних итерациях с коррекцией нелинейных коэффициентов во внешних итерациях [8].

Из-за высокой трудоемкости процесса решения на ЭВМ систем уравнений гидродинамики был разработан метод табличной подстановки с вычислением промежуточных значений интерполяцией. Суть метода заключается в нахождении значений коэффициентов гидродинамических сил c_x , c_y , c_z в точках соединения с гибкими элементами путем квадратичной интерполяции значений в ячейках трехмерного массива, индексы которого определяются по значениям углов Эйлера путем линейного соответствия. Значение гидродинамической составляющей внешней силы, приложенной к узлу, определяются по формуле

$$\mathbf{R} = \frac{1}{2} S \rho V^2 \mathbf{c},$$

где \mathbf{R} – вектор силы гидродинамического сопротивления; S – характерная площадь твердотельного элемента; ρ – плотность воды; V – модуль скорости потока относительно твердотельного элемента; \mathbf{c} – вектор гидродинамических коэффициентов.

Построение таблиц происходит однократно для каждого типа изделия. Данные таблиц помещаются в базу данных элементов вместе с их трехмерными моделями и другими привязанными.

Указанный метод позволяет определить силы гидродинамического сопротивления без учета зависимости гидродинамических коэффициентов от скорости.

Поскольку в режимах траления такая зависимость невысокая, метод подходит для быстрых предварительных расчетов. Для окончательных расчетов необходимо использовать таблицы большей размерности, в которых в качестве входных величин добавляются скорость потока и вязкость (например, при использовании проектируемого орудия рыболовства в водоемах с различной соленостью). То же относится и к не совсем линейной зависимости сил от характерной площади. Для однотипных элементов, но разного размера, можно использовать отдельные таблицы преобразований. В итоге в задачах расчета с повышенной точностью таблица преобразований становится четырех-шестимерной, а в ее ячейках указываются не гидродинамические коэффициенты, а силы гидродинамического сопротивления.

Кроме гибких ниток, веревок и канатов в рыболовных тралах используются гибкие ваеры, кабели, гидродинамические щитки. Последние предназначены для увеличения подъемной силы верхней подборы с целью обеспечения вертикального раскрытия устья трала. Расчет ваеров и кабелей происходит аналогично расчету нитевидных элементов.

Рассмотрим метод описания гидродинамического щитка в общей математической модели точечных масс для гибких элементов. Разместим точечные массы в узлах прямоугольной регулярной сетки на поверхности щитка. Определим связи между узлами так, как показано на рис. 2.

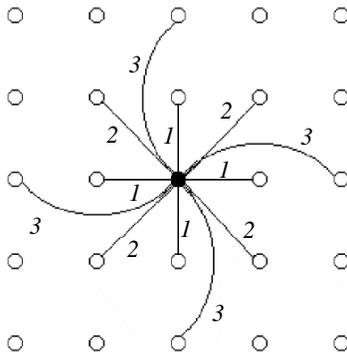


Рис. 2. Взаимодействия точечных масс в гидродинамическом щитке
Fig. 2. Mass-point interactions in a hydrodynamic flap

На рис. 2 цифрами обозначены: 1 – связи, определяющие противодействие сжатию / растяжению, аналогично связям для нитевидных элементов; 2 – связи, определяющие противодействие сдвигу слоев материала щитка; 3 – связи, определяющие противодействие изгибу щитка.

Вывод зависимостей, связывающих силовые и геометрические характеристики гидродинамического щитка с учетом указанных выше связей, приведен в [9].

С целью визуализации результатов расчета в САПР-ОР был разработан программный модуль 3D-визуализатора, показанный на рис. 3. 3D-визуализатор предназначен для отображения пространственной формы орудия рыболовства и его силовых характеристик (сил натяжения в гибких элементах). На рис. 4, 5 показан 3D-визуализатор в режиме отображения силовых характеристик трала (см. рис. 4) и в режиме повышенной детализации участка верхней подборы (см. рис. 5).

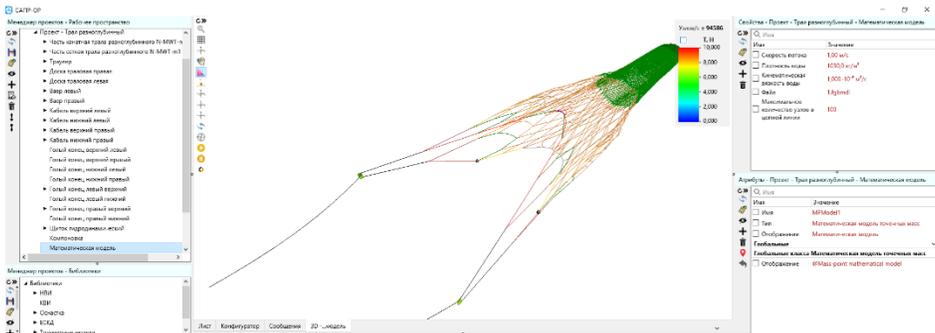


Рис. 3. 3D-визуализатор
Fig. 3. 3D visualizer

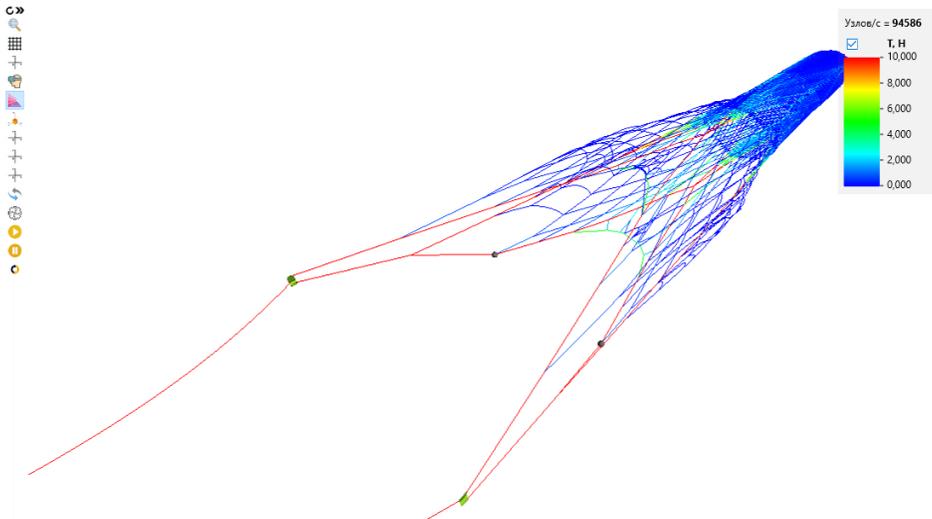


Рис. 4. Силовые характеристики трала
Fig. 4. Tension forces in trawl elements



Рис. 5. Детализированный вид участка верхней подборки
Fig. 5. A detailed view of a headline part

В 3D-визуализаторе при формировании изображения трехмерной сцены на экране используется встроенный в операционную систему Windows API Direct3D, входящий в библиотеку DirectX [10]. Орудие рыболовства может отображаться в следующих режимах:

- изометрическая проекция (в трех плоскостях);
- перспективная проекция;
- стереоскопический (в случае наличия устройства стерео-отображения) [11].

Описанный метод расчета реализован на графическом процессоре с использованием DirectCompute, шейдерной модели версии 5 и языка программирования шейдеров HLSL [12]. Ниже приведен участок кода шейдера для расчета внутренних сил:

```
[numthreads(1024,1,1)]
void IntLinks(uint3 i : SV_DispatchThreadID)
{
    if(i.x < LinksCount)
    {
        int4 j = CLinks[i.x].nodes;
        float w1 = CNodes[j.x].wi, w2 = CNodes[j.y].wi;
        float4 d = Nodes[j.y].X - Nodes[j.x].X;
        float L2 = dot(d, d);
        float L = sqrt(L2);
        float w = w1 + w2;
        ...
    }
    DeviceMemoryBarrierWithGroupSync();
}
```

Перед расчетом задаются следующие параметры условий лова: скорость течения, плотность, вязкость воды. Для настройки математической модели для каждой группы ниток, веревок, канатов, применяемых в рыболовном трале, задается количество узлов в цепной линии при разбиении гибкого нитевидного элемента на элементарные связи. Указанные входные характеристики вместе с результатами расчета сохраняются в файл модели орудия рыболовства для возможности последующей его загрузки в САПР-ОР. Результаты расчета представляют собой списки узлов и связей (граф математической модели) с их входными (диаметр, структура, жесткость и др.) и расчетными (сила натяжения связи, координаты узлов и др.) характеристиками.

Апробация результатов и их анализ

Для определения вычислительных показателей описанного метода расчета было проведено тестирование САПР-ОР на оборудовании с основными характеристиками, представленными в табл. 1–6.

Конфигурации оборудования № 1 и № 2 выбраны исходя из проверки выполнения минимальных требований, предъявленных к аппаратной части. В процессе тестирования вся необходимая информация отображалась в САПР-ОР.

Таблица 1

Характеристики оборудования № 1

№	Наименование	Характеристика
1	Персональный компьютер с ОС MS Windows 10 и выходом в Интернет	
1.1	Центральный процессор	4-ядерный AMD GX-415GA, 1.5 ГГц
1.2	Видеоадаптер	Встроенный в центральный процессор, AMD Radeon HD 8330E, 1 Гб
1.3	Оперативная память	Двухканальная, емкостью 16 Гб
1.4	Диск	SSD, емкостью 512 Гб
2	Монитор	Диагональ 19 дюймов, форм-фактор 4:3, разрешение 1 280 × 1 024

Таблица 2

Характеристики оборудования № 2

№	Наименование	Характеристика
1	Персональный компьютер с ОС MS Windows 10 и выходом в Интернет	
1.1	Центральный процессор	2-ядерный Intel Core i5-5300U, 2.3 ГГц
1.2	Видеоадаптер	Intel HD Graphics 5500, 1 Гб
1.3	Оперативная память	Двухканальная, емкостью 8 Гб
1.4	Диск	SSD, емкостью 256 Гб
2	Монитор	Диагональ 15 дюймов, форм-фактор 16:9, разрешение 1 920 × 1 080

Таблица 3

Характеристики оборудования № 3

№	Наименование	Характеристика
1	Персональный компьютер с ОС MS Windows 10 и выходом в Интернет	
1.1	Центральный процессор	4-ядерный AMD Phenom II x4, 3.2 ГГц
1.2	Видеоадаптер	AMD Radeon HD7850, 1 Гб
1.3	Оперативная память	Двухканальная, емкостью 12 Гб
1.4	Диск	Гибридный, емкостью 2 Тб
2	Монитор 1	Диагональ 19 дюймов, форм-фактор 4:3, разрешение 1 280 × 1 024
3	Монитор 2	Диагональ 28 дюймов, форм-фактор 16:9, разрешение 3 840 × 2 160
4	Устройства 3D-ввода	Датчик движения рук Leap Motion 3D
5	Устройство объемной стереоскопической визуализации	3D-телевизор с LCD-экраном поляризационного типа, диагональ 42 дюйма, форм-фактор 16:9, разрешение 1 920 × 1 080
6	Принтер	Лазерный
7	Сканер	Планшетный

Таблица 4

Характеристики оборудования № 4

№	Наименование	Характеристика
1	Персональный компьютер с ОС MS Windows 10 и выходом в Интернет	
1.1	Центральный процессор	8-ядерный AMD Ryzen 7 2700 3.2 ГГц
1.2	Видеоадаптер	AMD Radeon HD 7850, 1 Гб
1.3	Оперативная память	Двухканальная, емкостью 16 Гб
1.4	Диск	SSD, емкостью 1 Тб
2	Монитор	Диагональ 19 дюймов, форм-фактор 16:9, разрешение 1 920 × 1 080
3	Устройства 3D-ввода	Датчик движения рук Leap Motion 3D
4	Устройство объемной стереоскопической визуализации	3D-телевизор с LCD-экраном поляризационного типа, диагональ 42 дюйма, форм-фактор 16:9, разрешение 1 920 × 1 080
5	Принтер, сканер	МФУ

Таблица 5

Характеристики оборудования № 5

№	Наименование	Характеристика
1	Персональный компьютер с ОС MS Windows 10 и выходом в Интернет	
1.1	Центральный процессор	6-ядерный Intel Xeon E-2176M, 2.7 ГГц
1.2	Видеоадаптер	NVIDIA Quadro P2000, 4 Гб
1.3	Оперативная память	Двухканальная, емкостью 64 Гб
1.4	Диск	SSD, емкостью 512 Тб
2	Монитор	Диагональ 15 дюймов, форм-фактор 16:9, разрешение 2 560 × 1 440

Таблица 6

Характеристики оборудования № 6

№	Наименование	Характеристика
1	Персональный компьютер с ОС MS Windows 10 и выходом в Интернет	
1.1	Центральный процессор	6-ядерный Intel Core i7-10750H, 2.6 ГГц
1.2	Видеоадаптер	NVIDIA GeForce RTX 3060 Laptop, 1 Гб
1.3	Оперативная память	Двухканальная, емкостью 8 Гб
1.4	Диск	SSD, емкостью 512 Гб
2	Монитор	Диагональ 15 дюймов, форм-фактор 16:9, разрешение 1 920 × 1 080

Тестирование выполнялось в разрезах характеристик оборудования и количества узлов модели (расчетной схемы). При тестировании использовалось две модели:

- с большим количеством узлов – разноглубинного трала (см. рис. 4);
- с небольшим количеством узлов – участка ставной сети (рис. 6).

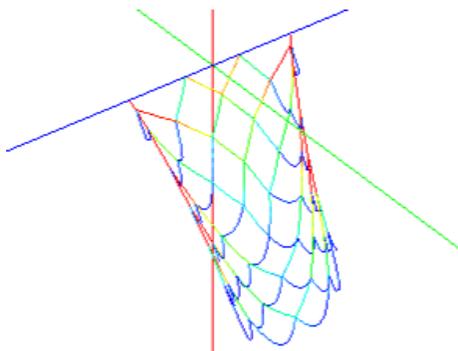


Рис. 6. Участок ставной сети
Fig. 6. A gill net segment

Количество узлов модели регулировалось установкой различных значений максимального количества разбиений нитевидного элемента орудия рыболовства между его узлами (рис. 7).

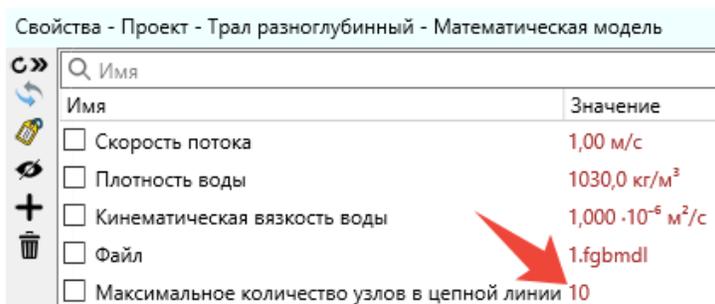


Рис. 7. Установка максимального количества узлов в цепной линии
Fig. 7. Setting of the maximum number of nodes in a chain line

Тестирование загрузки оперативной памяти персонального компьютера выполнялось в разрезе количества узлов модели на оборудовании № 4. Загрузка измерялась монитором ресурсов ОС Windows. Тестирование производительности выполнялось в разрезах характеристик оборудования и количества узлов модели (расчетной схемы). Результаты тестирования приведены в табл. 7, 8.

Таблица 7

Результаты тестирования в разрезе количества узлов модели

Узлов, тыс.	Производительность, тыс. узлов/с			Загрузка оперативной памяти, МБ
	Оборудование № 1	Оборудование № 4	Оборудование № 6	
0.15	3	7	10	110
1.89	4	16	117	114
118	12	95	283	140
651	15	130	590	210
1230	16	145	660	300

Результаты тестирования производительности на модели трала, состоящей из 118 тыс. узлов, в разрезе оборудования

№ оборудования	Производительность, тыс. узлов/с
1	12
2	21
3	82
4	95
5	110
6	283

Расчет силовых и геометрических характеристик модели происходит на графическом процессоре, поэтому производительность расчета напрямую зависит от применяемого видеоадаптера. По данным, представленным в табл. 8, видно, что наибольшей производительностью обладает современный видеоадаптер NVIDIA GeForce RTX 3060, а наименьшей – встроенный в центральный процессор AMD Radeon HD 8330E.

На рис. 8 показаны графики зависимости производительности вычислений от количества узлов модели для оборудования № 1, 4 и 6.

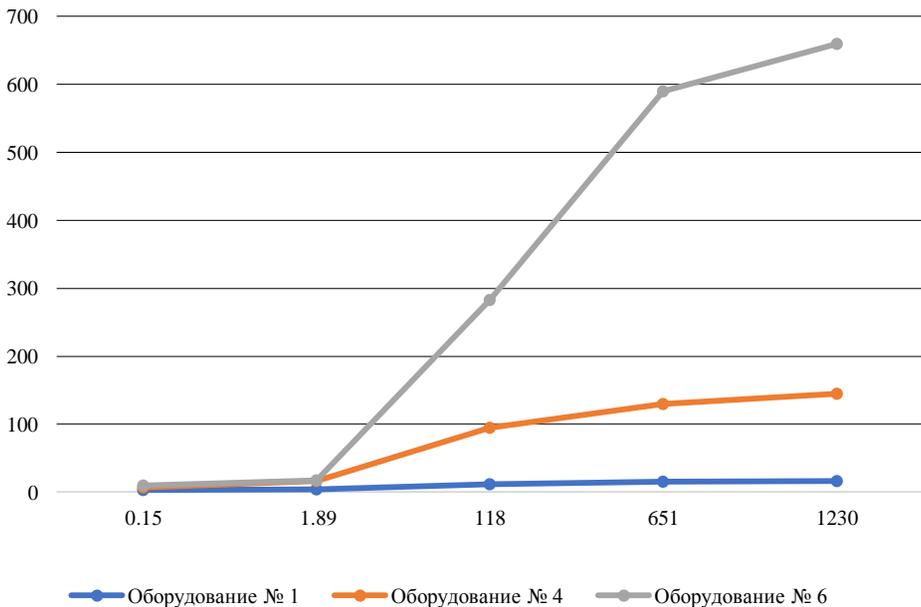


Рис. 8. Зависимость производительности вычислений от количества узлов модели
Fig. 8. Computing performance as a function of the number of nodes in the model

Из данных, представленных на рис. 8 и в табл. 7, видно, что производительность увеличивается при увеличении количества узлов. Это связано с недоза-

грузкой вычислительных блоков графического процессора при небольшом количестве узлов. Каждый вычислительный блок может одновременно обрабатывать определенное количество однотипных данных (в нашем случае узлов или связей) по одному алгоритму. Причем чем мощнее графический процессор, тем больше количество одновременно обрабатываемых данных. Если данных меньше, чем способен обрабатывать вычислительный блок, то часть ресурсов графического процессора не задействуется.

С целью определения точности вычисления силовых и геометрических характеристик рыболовного трала в гидроканале ООО «Фишеринг Сервис» были проведены лабораторные испытания на изготовленной физической модели трала (рис. 9).

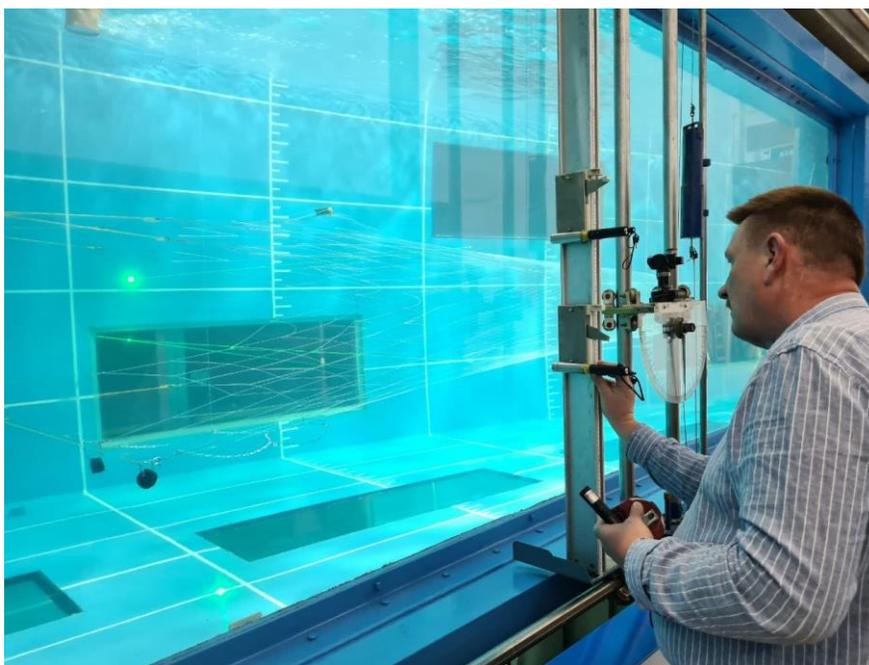


Рис. 9. Эксперименты с физической моделью трала в гидроканале
Fig. 9. Experiments with a physical model of a trawl in a hydrochannel

При испытаниях использовалось оборудование с характеристиками, указанными в табл. 6. Результаты расчета горизонтального раскрытия трала и натяжений в кабелях были сопоставлены с результатами замеров в гидроканале, полученных в ходе проведения экспериментов на модели трала.

В табл. 9 приведены сравнительные результаты расчета и измерений горизонтального раскрытия трала и натяжений в его кабелях. При расчете погрешностей использовались математические зависимости

$$\delta X = \frac{\Delta X}{X_{\text{и}}} \cdot 100\%, \quad \Delta X = |X_{\text{и}} - X_{\text{р}}|$$

где δX – относительная погрешность в процентах; ΔX – абсолютная погрешность, $X_{\text{и}}$ – измеренная величина; $X_{\text{р}}$ – расчетная величина.

Сравнительные результаты расчета и измерений

Параметр	Скорость потока воды, м/с	Расчетное значение	Измеренное значение	Погрешность, %
Вертикальное раскрытие устья трала, м	1.00	1.22	1.25	2.4
	1.55	0.99	1.01	2.0
Горизонтальное раскрытие устья трала, м	1.00	1.49	1.53	2.6
	1.55	1.47	1.51	2.7
Сила натяжения в верхнем кабеле, Н	1.00	19.7	19.0	3.7
	1.55	63.7	61.0	4.4
Сила натяжения в нижнем кабеле, Н	1.00	13.0	12.6	3.2
	1.55	24.8	23.7	4.6

Жирным шрифтом в табл. 9 выделены значения максимальной погрешности по шагу испытаний.

Заключение

Разработаны универсальные математическая база, имитационные алгоритмы расчета и трехмерной визуализации формы рыболовного трала и нагрузок в его элементах под действием гидростатических и гидродинамических сил при заданных характеристиках места промысла и условиях процесса эксплуатации, оптимизированные для многоядерных и гетерогенных вычислений. Разработанные алгоритмы внедрены в систему автоматизированного проектирования орудий промышленного рыболовства. С целью определения вычислительных показателей (скорости расчета) и их анализа проведено тестирование работы вычислительных алгоритмов. Для определения точности вычисления силовых и геометрических характеристик проведены эксперименты на физической модели рыболовного трала, результаты которых сопоставлены с результатами вычислений.

Сравнительный анализ показал, что погрешность вычислений геометрических характеристик трала не превышает 3%, а силовых характеристик – 5%.

Список источников

1. Li Y., Zou X., Zhang X., Zhang M., Chen X., Song L., Zhou Y. Modeling of the Midwater Trawl Dynamical Behavior Based on R Language // 2015 International Conference on Mechatronics, Electronic, Industrial and Control Engineering (MEIC-15). 2015. Atlantis Press, 2015. С. 1092–1095. doi: 10.2991/meic-15.2015.248
2. Freiria P.J. Dynamic modeling of trawl fishing gear components // Ship Science and Technology. 2012. V. 6 (11). P. 57–65.
3. Недоступ А.А., Ражев А.О., Коротков В.К. Моделирование композитных сетных конструкций методом точечных масс при динамической постановке задачи // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 4 (42), т. 4. С. 254–258.
4. Beirao da Veiga L., Brezzi F., Cangiani A., Manzini G., Marini L.D., Russo A. Basic principles of Virtual Element Methods // Mathematical Models and Methods in Applied Sciences. 2013. V. 23 (1). P. 199–214. doi: 10.1142/S0218202512500492
5. Logan D.L. A first course in the finite element method. Cengage Learning, 2011. 808 с.

6. Priour D. A finite element method for netting: Application to fish cages and fishing gear. Springer Briefs in Environmental Science, 2013. 107 p. doi: 10.1007/978-94-007-6844-4
7. Журавлев В.Ф. Основы теоретической механики. 2-е изд., перераб. М. : Физматлит, 2001. 320 с.
8. Недоступ А.А., Ражев А.О. Математическая модель взаимодействия распорной траловой доски с водной средой // Морские интеллектуальные технологии. 2017. № 3 (37), т. 1. С. 154–157.
9. Недоступ А.А., Ражев А.О., Коротков В.К. Дискретная математическая модель гибкого подъемного тралового щитка // Морские интеллектуальные технологии. 2017. № 4 (38), т. 2. С. 207–211.
10. Sherrod A., Jones W. Beginning DirectX 11 Game Programming. Boston, MA : Course Technology, 2021. 372 с.
11. Рожков С.Н., Овсянникова Н.А. Стереоскопия в кино-, фото-, видеотехнике : терминологический словарь. М. : Парадиз, 2003. 136 с.
12. Varcholik P. Real-Time 3D Rendering with DirectX and HLSL: A Practical Guide to Graphics Programming. Addison-Wesley Professional, 2014. 592 с.

References

1. Li Y., Zou X., Zhang X., Zhang M., Chen X., Song L., Zhou Y. (2015) Modeling of the midwater trawl dynamical behavior based on R language. *International Conference on Mechatronics, Electronic, Industrial and Control Engineering (MEIC-15)*. Atlantis Press. pp. 1092–1095. doi: 10.2991/meic-15.2015.248
2. Freiria P.J. (2012) Dynamic modeling of trawl fishing gear components. *Ship Science and Technology*. 6(11). pp. 5–65. doi: 10.25043/19098642.71
3. Nedostup A.A., Razhev A.O., Korotkov V.K. (2018) Modelirovanie kompozitnykh setnykh konstruksiy metodom tochechnykh mass pri dinamicheskoy postanovke zadachi [Modelling composite net structures using the method of point masses in dynamic statement of a problem]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii – Marine Intellectual Technologies*. 4(42). 4. pp. 254–258.
4. Beirao da Veiga L., Brezzi F., Cangiani A., Manzini G., Marini L.D., Russo A. (2013) Basic principles of virtual element methods. *Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*. 23(1). pp. 199–214. doi: 10.1142/S0218202512500492
5. Logan D.L. (2011) *A First Course in the Finite Element Method*. Cengage Learning.
6. Priour D. (2013) *A Finite Element Method for Netting: Application to Fish Cages and Fishing Gear*. Springer Briefs in Environmental Science. doi: 10.1007/978-94-007-6844-4
7. Zhuravlev V.F. (2001) *Osnovy teoreticheskoy mekhaniki* [Fundamentals of theoretical mechanics]. Moscow: Fizmatlit.
8. Nedostup A.A., Razhev A.O. (2017) Matematicheskaya model' vzaimodeystviya raspornoy tralovoy doski s vodnoy sredoy [Mathematical model of interaction of the trawl door with the aquatic environment]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii – Marine Intellectual Technologies*. 3(37). 1. pp. 154–157.
9. Nedostup A.A., Razhev A.O., Korotkov V.K. (2017) Diskretnaya matematicheskaya model' gibkogo pod'emnogo tralovogo shchitka [Discrete mathematical model of the trawl lifting flexible hydrodynamic flap]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii – Marine Intellectual Technologies*. 4(38). 2. pp. 207–211.
10. Sherrod A., Jones W. (2012) *Beginning DirectX 11 Game Programming*. Boston, MA: Course Technology.
11. Rozhkov S.N., Ovsyannikova N.A. (2003) *Stereoskopiya v kino-, foto-, videotekhnike* [Stereoscopy in cinema, photo, video equipment]. Moscow: Mir.
12. Varcholik P. (2014) *Real-Time 3D Rendering with DirectX and HLSL: A Practical Guide to Graphics Programming*. Addison-Wesley Professional.

Сведения об авторах:

Ражев Алексей Олегович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ управления научно-исследовательской деятельности Калининградского государственного технического университета, Калининград, Россия. E-mail: aleksej.razhev@klgtu.ru

Недоступ Александр Алексеевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой промышленного рыболовства Калининградского государственного технического университета, Калининград, Россия. E-mail: nedostup@klgtu.ru

Information about the authors:

Razhev Aleksey O. (Candidate of Technical Sciences, Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russian Federation). E-mail: aleksej.razhev@klgtu.ru

Nedostup Aleksandr A. (Candidate of Technical Sciences, Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russian Federation). E-mail: nedostup@klgtu.ru

Статья поступила в редакцию 05.03.2022; принята к публикации 03.02.2023

The article was submitted 05.03.2022; accepted for publication 03.02.2023