

DOI: 10.24143/2073-5529-2018-4-104-110
УДК 639.2.081.117.212

Т. Л. Чемакина

ИДЕАЛИЗАЦИЯ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ КАНАТНОЙ ЧАСТИ РАЗНОГЛУБИННОГО ТРАЛА

Выбран наиболее перспективный подход к анализу напряженного состояния сетных орудий лова. Предложен ряд допущений и упрощений для определения сил, действующих на конечный элемент трала. С точки зрения расчета на прочность элементов траловой оснастки наиболее пристального изучения заслуживает канатная часть трала, т. к. в канатной части элементы подвержены наиболее неравномерному натяжению. Кроме того, канатная часть трала является наиболее материалоемкой. Масса канатной части трала составляет около 2/3 от всей массы трала. Поэтому именно для канатной части трала является важным определение минимальных диаметров каната без ухудшения ее прочностных характеристик. Из анализа схемы построения трала следует, что трал представлен в виде ограниченного числа одномерных конечных элементов, соединенных между собой в узлах канатной сети. Кабели от места крепления до голых концов и голые концы считаются также отдельными прямыми элементами. На каждый элемент действует сила гидродинамического сопротивления, сила веса и некоторая продольная сила. При составлении расчетной схемы гидродинамические подъемные устройства заменяются сосредоточенными силами, приложенными к узлам верхней подбора, грузы на нижней подборе также заменяются сосредоточенными силами. При известной ориентации их относительно потока жидкости можно вычислить реакции в узлах элементов по направлению координат узлов. Предложены формулы для определения сил, действующих на конечный элемент канатной части трала, которые могут быть использованы при составлении программы расчета на прочность канатной части разноглубинных тралов.

Ключевые слова: канатный трал, подбора, кухтыли, кабели, распорные доски, одномерный конечный элемент.

Введение

Наиболее перспективный подход к анализу напряженного состояния сетных орудий лова связан с использованием метода конечных элементов (МКЭ), хорошо зарекомендовавшего себя при решении большого числа прикладных задач [1]. Метод конечных элементов в настоящее время является одним из самых распространенных методов расчета широкого круга инженерных задач, например прочностных расчетов. В МКЭ конструкция с помощью воображаемых разрезов разделяется на ряд частей – конечных элементов. Размеры элемента обычно малы по сравнению с размерами всей конструкции, но они имеют конечные значения. Таким образом, осуществляется переход от системы с бесконечным числом параметров напряженного состояния к системе с конечным числом параметров.

В результате дискретизации исходный объект представляется совокупностью конечного числа элементов, связанных между собой в общих точках – узлах. Узел расчетной схемы может быть общим для нескольких конечных элементов. Выбор типа, формы элементов и числа узловых точек исходного объекта зависит от характера рассматриваемой задачи, от той точности решения, которую требуется обеспечить.

Состояние проблемы

Современный трал представляет собой сложную пространственную систему, состоящую из канатной и сетной частей, продольных связей-топенантов и средств раскрытия. Основные размеры тралов – горизонтальное и вертикальное раскрытие. Верхнюю подбору разноглубинных тралов оснащают шаровыми кухтылями со статической подъемной силой и гидродинамическими подъемными устройствами. На верхней подборе располагают в основном от 30 до 200 кухтылей. Как правило, кухтыли наиболее плотно размещают в районе гужа. Нижнюю подбору разноглубинных тралов оснащают грузом – отрезками цепей или стальным канатом [2]. С точки зрения расчета на прочность элементов траловой оснастки наиболее пристального изучения заслуживает канатная часть трала. В канатной части элементы подвержены наиболее неравномерному

натяжению. Канатная часть предназначена для того, чтобы от усилий в голых концах, приложенных в отдельных точках, передать равномерную нагрузку на сетную часть трала. С другой стороны, канатная часть трала является наиболее материалоемкой. Масса канатной части трала составляет около 2/3 от всей массы трала. Поэтому именно для канатной части трала является важным определение минимальных диаметров каната без ухудшения ее прочностных характеристик.

На основании вышеизложенного поставлена задача: с использованием МКЭ разработать схему канатной части разноглубинного трала для расчета на прочность.

Идеализация расчетной схемы

Модель канатной части трала состоит из ограниченного числа конечных элементов. В качестве элементов рассматриваются одномерные элементы, заключенные между узлами канатной сети. Кабели от места крепления до голых концов и голые концы считаются также отдельными прямыми элементами. Гидродинамический щиток заменяется приближенно сосредоточенными силами, приложенными к узлам верхней подборки, в сумме равными весу углубителя, приложенного к нижним голым концам. Распределение подъемной силы по узлам верхней подборки показано на рис. 1.

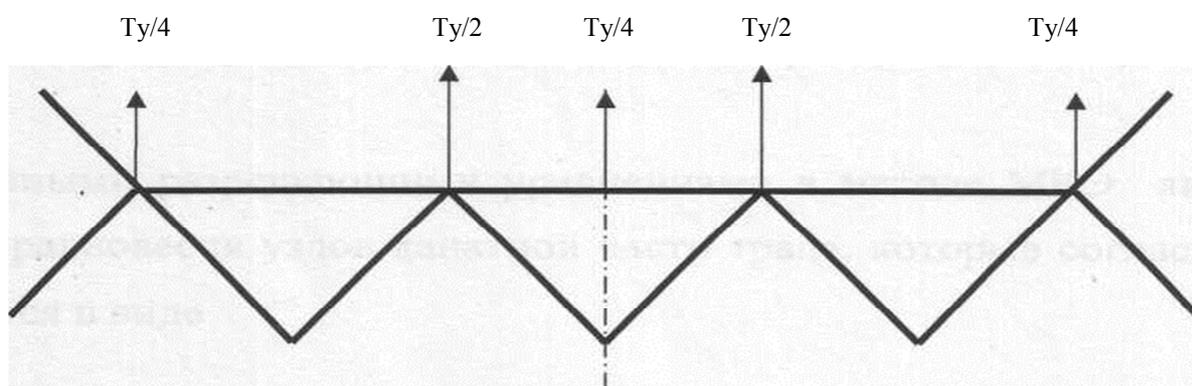


Рис. 1. Схема распределения подъемной силы по узлам верхней подборки: T_y – вес углубителя [3, 4]

При расчете будем предполагать, что при тралении трал не имеет перекосов и его форма полностью симметрична относительно диаметральной плоскости судна. Тогда при его расчете можно рассматривать только одну из симметричных частей. Учет симметрии снижает количество неизвестных практически вдвое.

Совместим начало координат с точками крепления кабелей к распорным доскам. При этом ось Z будет направлена в сторону, противоположную движению судна, и совмещена с диаметральной плоскостью судна на глубине, соответствующей середине траловых досок по высоте. Ось Y направлена вертикально вверх, а ось X – таким образом, чтобы оси X , Y , Z образовали правую тройку.

Из всей траловой системы рассмотрим ее часть, состоящую из досок, кабелей, голых концов, углубителей, кухтылей, гидродинамических щитков раскрытия и канатной части трала. Воздействие оставшейся части трала на рассматриваемую представим в виде равномерно распределенной нагрузки по узлам канатной части трала, примыкающей к сетной. При этом будем предполагать, что расположение опорных досок остается неизменным и заданным, т. е. координаты крепления кабелей к доске будем считать известными ($x_g, \pm y_g, z_g$).

В качестве неизвестных принимаются координаты узловых точек конечных элементов. Разрешающими уравнениями являются уравнения равновесия узлов траловой системы. Предполагается, что неизвестные координаты узлов элементов принимают некоторые значения. По этим значениям координат узлов можно вычислить ориентацию элемента в пространстве, а значит, и ориентацию относительно потока жидкости (рис. 2).

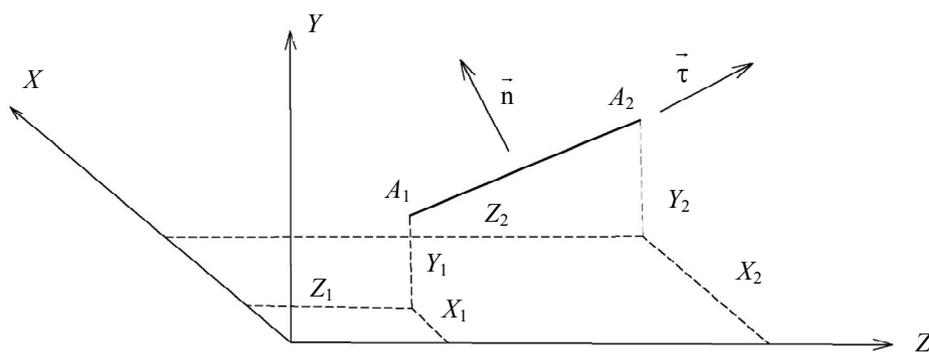


Рис. 2. Система координат для одномерного прямолинейного конечного элемента

При известной ориентации их относительно потока жидкости можно вычислить реакции в узлах элементов по направлению координат узлов. Таким образом, получаем зависимость

$$R_i = R_i(A_j), \quad (1)$$

где R – реакция в узлах по направлению i -й координаты; A_j – координаты узловых точек элемента.

Пусть в некотором узле сходится m элементов и по некоторой координате i вычислены реакции во всех элементах, сходящихся в этом узле, R_{im} по формуле (1). Кроме того, в этом узле приложена также внешняя сила P_i . Тогда для равновесия необходимо, чтобы сумма проекций всех сил на направление координаты i равнялась нулю:

$$\sum_{m+1}^n R_{im}(A_j) + P_i = 0. \quad (2)$$

Уравнение типа (2) можно составить для всех координат узловых точек канатной части трала. Следовательно, форма трала и его напряженное состояние описывается системой нелинейных алгебраических уравнений типа (2). Рассмотрим зависимость реакции в узлах для некоторого прямолинейного элемента от его направления и сопротивления при движении его в жидкости. Пусть узлы элемента A_1 и A_2 имеют координаты x_1, y_1, z_1 и x_2, y_2, z_2 в общей системе координат X, Y, Z (рис. 2).

Орт, совпадающий с осью конечного элемента, направлен из точки A_1 в точку A_2 и имеет вид

$$\vec{\tau} = \alpha_x \cdot \vec{i} + \alpha_y \cdot \vec{j} + \alpha_z \cdot \vec{k};$$

$$\alpha_1 = \frac{x_2 - x_1}{l}; \alpha_2 = \frac{y_2 - y_1}{l}; \alpha_3 = \frac{z_2 - z_1}{l},$$

где $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – орты осей координат; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – направляющие косинусы конечного элемента; l – длина элемента.

$$\text{Длина элемента } l = \sqrt{((x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2)}.$$

Поток направлен вдоль оси Z , и его скорость может быть представлена вектором

$$\vec{v} = v_0 \cdot \vec{k},$$

где v_0 – скорость траления.

Нормальная составляющая скорости потока к элементу имеет вид

$$\vec{v}_n = (\beta_1 \cdot \vec{i} + \beta_2 \cdot \vec{j} + \beta_3 \cdot \vec{k}) \cdot v_n, \quad (3)$$

где v_n – модуль нормальной составляющей; $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ – направляющие косинусы ее орта.

Учитывая, что \vec{v}_n перпендикулярен $\vec{\tau}$, имеем:

$$\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2 + \alpha_3 \beta_3 = 0.$$

Кроме того, орты \vec{v} , \vec{v}_n , $\vec{\tau}$ лежат в одной плоскости, т. е.

$$\begin{vmatrix} \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 \\ \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = 0.$$

Отсюда имеем: $\beta_1 \alpha_2 - \beta_2 \alpha_1 = 0$.

Учитывая, что модуль орта равен единице, т. е. $\beta_1^2 + \beta_2^2 + \beta_3^2 = 1$, получаем систему уравнений для определения направляющих косинуса вектора \vec{n} в виде

$$\beta_1 \alpha_2 - \beta_2 \alpha_1 = 0;$$

$$\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2 + \alpha_3 \beta_3 = 0;$$

$$\beta_1^2 + \beta_2^2 + \beta_3^2 = 1.$$

Решая эту систему, получаем зависимости:

$$\beta_1 = \alpha_1 \alpha_3 / \beta_3; \beta_2 = \alpha_2 \alpha_3 / \beta_3; \beta_3 = \pm \sqrt{1 - \alpha_3^2}.$$

Для определения модуля вектора \vec{v}_n рассмотрим плоскость, составленную векторами \vec{v} , \vec{v}_n , $\vec{\tau}$ (рис. 3).

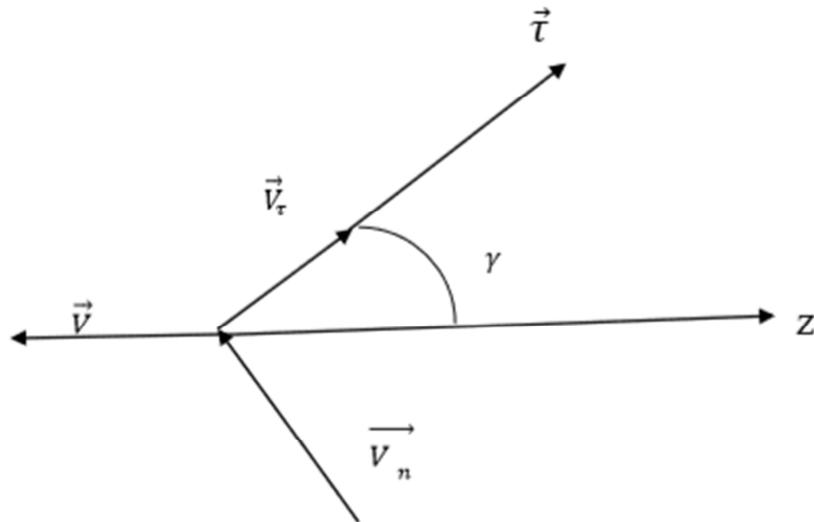


Рис. 3. Схема разложения скорости потока на нормальную и касательную составляющие

Из рис. 3 следует, что

$$v_n = v \cdot \sin \gamma;$$

$$v_\tau = v \cdot \cos \gamma,$$

где γ – угол между осью Z и вектором $\vec{\tau}$. Следовательно,

$$\cos\gamma = \alpha_3; \quad \sin\gamma = 1 - \alpha_3^2.$$

После подстановки в формулу (3) будем иметь:

$$\vec{v}_n = v_0 \sqrt{1 - \alpha_3^2} (\beta_1 \cdot \vec{i} + \beta_2 \cdot \vec{j} + \beta_3 \cdot \vec{k});$$

$$\vec{v}_\tau = v_0 \alpha_3 (\alpha_1 \cdot \vec{i} + \alpha_2 \cdot \vec{j} + \alpha_3 \cdot \vec{k}).$$

Интенсивность сил гидродинамического сопротивления q_τ и q_n будем определять по известным формулам [1]:

$$q_n = 0,5 C_n \cdot p v_n^2 \cdot d;$$

$$q_\tau = 0,5 C_\tau \cdot p v_\tau^2 \cdot d,$$

где C_n , C_τ – коэффициенты гидродинамического сопротивления; p – плотность воды; d – диаметр каната, мм.

Кроме сил сопротивления на одномерный элемент действуют также силы веса. Они направлены по вертикали вниз, и их интенсивность можно представить в виде

$$\vec{q}_G = q_0 \cdot \vec{j},$$

где q_0 – вес одного метра каната.

Равнодействующая сил веса G будет равна

$$\vec{G} = \vec{q}_G \cdot l.$$

Помимо этого, конечный элемент нагружен некоторой продольной силой T . При известном удлинении согласно закону Гука можно записать соотношение

$$\frac{T}{EF} = \frac{\Delta l}{l},$$

где $\Delta l = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2 + (Z_2 - Z_1)^2} - l_{1,20}$; EF – жесткость каната на растяжение; $l_{1,20}$ – исходная длина элемента.

Отсюда усилие в элементе определяем выражением

$$T = \frac{EF}{l} \left(\sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2 + (Z_2 - Z_1)^2} - l_{1,20} \right).$$

Основными разрешающими уравнениями в МКЭ являются уравнения равновесия узлов канатной части троса, которые согласно [2] принимаются в виде

$$\sum_{j=1}^n R_{ij} + P_i = 0. \quad (4)$$

По формуле (4) с использованием чертежа канатной части конкретного троса можно создать алгоритм расчета канатной части троса и получить рекомендации по снижению диаметров элементов без ухудшения прочностных характеристик троса.

Заключение

В результате проведенных исследований определена наиболее материалоемкая часть троса: часть, состоящая из досок, кабелей, голых концов, углубителей, кухтылей, гидродинамических щитков раскрытия и канатной части троса. Составлены уравнения равновесия для

всех координат узловых точек канатной части трала. Получено уравнение для определения усилия, возникающего в отдельном элементе системы и уравнение равновесия узлов канатной части трала, которые являются разрешающими уравнениями в МКЭ.

Приведенные в статье формулы могут быть использованы при составлении программы расчета на прочность канатной части разноглубинных тралов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мяченков В. И., Мальцев В. П., Майборода В. П. и др.* Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов: справ. / под общ. ред. В. И. Мяченкова. М.: Машиностроение, 1989. 520 с.
2. *Фридман А. Л.* Теория и проектирование орудий промышленного рыболовства. М.: Лег. и пищ. пром-сть, 1981. 328 с.
3. *Чемакина Т. Л., Ветров А. П., Громова Е. Н.* Расчет на прочность пелагического трала // Технические средства рационального морского и океанического промысла рыбы. Севастополь: Изд-во СПИ, 1990. С. 27–28.
4. *Чемакина Т. Л., Ветров А. П.* Расчет на прочность канатной части трала // Технические средства океанического промышленного рыболовства. Севастополь: Изд-во СПИ, 1990. С. 42–43.

Статья поступила в редакцию 02.06.2018

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Чемакина Тамара Львовна – Россия, 299053, Севастополь; Севастопольский государственный университет; канд. техн. наук, доцент; доцент кафедры океанотехники и кораблестроения; chemakina1951@gmail.com.



T. L. Chemakina

IDEALIZING THE DESIGN MODEL OF THE ROPE PART OF THE MIDWATER TRAWL

Abstract. The article presents a perspective approach to the analysis of a stress state of net gear. A set of assumptions and simplifications of determining the forces acting on the end part of the trawl have been proposed. In terms of strength analysis of the trawl gear elements, the rope section deserves a thorough study, since the rope section elements are subject to the most uneven tension. In addition, the rope section of the trawl is the most material-intensive. The mass of the rope trawl is about 2/3 of the total mass of the trawl. Therefore, it is important to determine the minimum rope diameter without losing its strength. It is evident from the analysis of the trawl construction scheme that the trawl is presented in the form of a limited number of one-dimensional finite elements linked in the nodes of a rope net. Rope length from the attachment point up to the bare end inclusive is also considered a single straight element. Each element is affected by the force of hydrodynamic resistance, the force of weight and some longitudinal force. When analyzing the design model, hydrodynamic lifting devices are substituted by concentrated forces applied to the nodes of the headline; loads on the low rope are also substituted by concentrated forces. Knowing their orientation relative to the stream flow, it is possible to calculate the reactions in the nodes of the elements using the node coordinates. Formulas determining the forces that act on the finite element of the trawl rope part have been proposed, which can be used to compile a program for calculating the strength of the rope part of mid-water trawls.

Key words: rope trawl, line, floats, cables, spacers, one-dimensional finite element.

REFERENSES

1. *Miachenkov V. I., Mal'tsev V. P., Maiboroda V. P. i dr. Raschety mashinostroitel'nykh konstruksii metodom konechnykh elementov: spravochnik* [Analysis of machine manufacturing structures using Finite Element Method]. Pod obshchei redaktsiei V. I. Miachenkova. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 520 p.
2. *Fridman A. L. Teoriia i proektirovanie orudii promyshlennogo rybolovstva* [Theory and design of commercial fishing gear]. Moscow, Legkaia i pishchevaia promyshlennost' Publ., 1981. 328 p.

3. Chemakina T. L., Vetrov A. P., Gromova E. N. Raschet na prochnost' pelagicheskogo trala [Strength analysis of a pelagic trawl]. *Tekhnicheskie sredstva ratsional'nogo morskogo i okeanicheskogo promysla ryby*. Sevastopol', Izd-vo SPI, 1990. Pp. 27-28.

4. Chemakina T. L., Vetrov A. P. Raschet na prochnost' kanatnoi chasti trala [Strength analysis of the trawl rope part]. *Tekhnicheskie sredstva okeanicheskogo promyshlennogo rybolovstva*. Sevastopol', Izd-vo SPI, 1990. Pp. 42-43.

The article submitted to the editors 02.06.2018

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Chemakina Tamara Lvovna – Russia, 299053, Sevastopol; Sevastopol State University; Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Ocean Engineering and Shipbuilding; chemakina1951@gmail.com.

