

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛ СОПРТИВЛЕНИЯ ВОДЫ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ДВИЖЕНИЯ ПРОМЫСЛОВОГО СУДНА С ТРАЛОМ

УДК 681.5

ГОЛИКОВ Сергей Павлович

к.т.н, доцент, декан Морского факультета Керченского государственного морского технологического университета

Научные интересы: Моделирование процессов в судовождении

СМЕТЮХ Надежда Павловна

аспирантка кафедры Электрооборудования судов и автоматизации производства

Керченского государственного морского технологического университета

Научные интересы: Моделирование процессов «Судно-трал»

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Преобладающая часть мировой продукции рыболовства (70-75 млн.т) состоит из морских рыб, добываемых многочисленным рыболовным флотом (1170 тыс. единиц, тоннаж 25,4 млн.т). К 2025 году прогнозируется увеличение морских уловов до 130 млн. тонн и соответствующее увеличение количества рыболовных судов. Современный рыбодобывающий флот превратился в мощный инструмент комплексного воздействия на морские экосистемы, что требует усиления мер по контролю и регулированию промысла с целью одновременного повышения промысловой эффективности и сохранения устойчивой сырьевой базы.

Создание и внедрение автоматизированных управляющих промысловых комплексов является важнейшим этапом перехода к рациональному использованию биологических ресурсов, сокращению энергетических затрат на добычу объектов лова и улучшению качества добываемого сырья.

Основным видом океанического промысла в настоящее время является траловый лов, на долю которого приходится 70% добытых морепродуктов, причем на долю разноглубинного тралового лова - 40%. Преобладающая роль разноглубинного тралового лова определяется его высокой эффективностью и селективностью. Кроме того, этот вид промысла оказался экологи-

чески более чистым, так как в процессе лова не нарушается экосистема морского дна. Поэтому можно без преувеличения отметить, что проблема совершенствования разноглубинного тралового лова относится к одной из основных в отрасли.

Для построения автоматизированных систем управления процессом тралового лова необходимо использование математических моделей, которые адекватно описывают прежде всего механическую часть системы – траловый комплекс.

В настоящее время изучение динамики траловых систем проводится с использованием так называемых стержневых маятниковых моделей. При таком моделировании элементами тралового комплекса считаются канатно-сетная часть трала, кабели, распорные доски, ваера. Реальный трал имеет, как правило, два ваера, две распорные доски, четыре кабеля. В маятниковых моделях оба ваера рассматриваются как один стержень, а все четыре кабеля – другой стержень, канатно-сетная часть и распорные доски представляются в виде материальных точек. Данный вид моделей строится исходя из симметрии всей системы относительно диаметральной плоскости судна.

В качестве базовой модели рассмотрим математическую модель пространственного движения траловой системы, разработанную Б.А. Альтшулем [1]. Схематизация траловой системы представлена на рис. 1

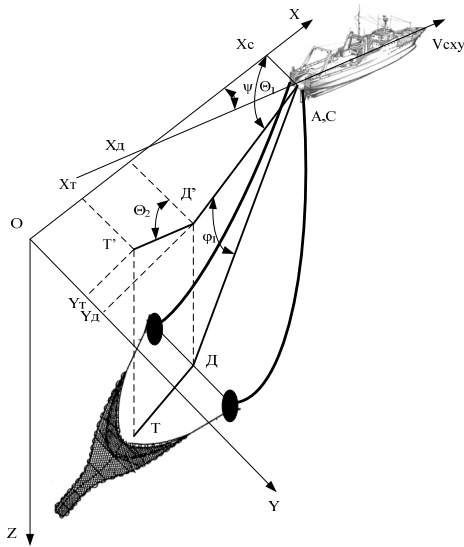


Рисунок 1 – Схематизация пространственного движения траловой системы

Сетная часть трала представляется в виде точки Т, доски схематизируются точкой Д. Кабели считаются невесомыми и моделируются отрезком ДТ, ваера представлены отрезком АД, с характеристиками идеально жесткого стержня. Точка А считается совпадающей с судном, имеющим заданную массу и тягу.

Положение в пространстве приведенной схемы траловой системы определяется следующими параметрами: координатами точки А (x_A, y_A, z_A), углом φ_1 между стержнем ваера АД и его проекцией АД' на горизонтальную плоскость, углом φ_2 между стержнем ваера ДТ

и его проекцией ДТ' на горизонтальную плоскость, углом Θ_1 между проекцией АД' и осью ОУ, углом Θ_2 между проекцией ДТ' и осью ОУ, длиной стержня, схематизирующего ваера, s_1 и длиной стержня, схематизирующего кабель s_2 .

Если рассматривается движение траловой системы с неизменной длиной вытравленного ваера то точка А имеет характеристики точки С, имитирующей судно. В случае выборки ваеров в процессе движения судна скорость точки А равна сумме векторов скорости судна V_C и скорости изменения длины ваера.

Приведенная голономная механическая система может быть описана дифференциальным уравнением Лагранжа второго рода:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial T}{\partial q} = Q_q,$$

где T – кинетическая энергия системы, q – обобщенная координата системы, \dot{q} – обобщенная скорость системы, Q_q – обобщенная сила.

Полученная Б.А. Альтшулем система, имеющая пять обобщенных координат $\varphi_1, \varphi_2, \Theta_1, \Theta_2, s_1$, пространственное нестационарное движение которой описывается пятью дифференциальными уравнениями, имеет вид:

$$\begin{aligned} & \left(m_D + \frac{1}{2} m_T + \frac{\mu l}{3} \right) \left(\ddot{\varphi}_1 + \Theta_1^2 \cos \varphi_1 \sin \varphi_1 \right) \cdot s_1 + \\ & + \left(m_D + \frac{1}{2} m_T + \frac{\mu l}{2} \right) \left[2s_1 \dot{\varphi}_1 + \ddot{z}_c \cos \varphi_1 + \right. \\ & \left. + \left(V_{CXY} \sin(\Psi + \Theta_1) + \dot{\Psi} V_{CXY} \sin(\Psi + \Theta_1) \right) \sin \varphi_1 \right] + \\ & + m_T s_2 \left[\ddot{\varphi}_2 (\sin \varphi_1 \sin \varphi_2 \cos(\Theta_2 - \Theta_1) + \cos \varphi_1 \cos \varphi_2) + \dot{\varphi}_2^2 (\sin \varphi_1 \sin \varphi_2 \cos(\Theta_2 - \Theta_1) - \cos \varphi_1 \sin \varphi_2) - \right. \\ & \left. - \dot{\varphi}_2 \dot{\Theta}_2 \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 (1 + \sin(\Theta_2 - \Theta_1)) + \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 (\ddot{\Theta}_2 \sin(\Theta_2 - \Theta_1) - \dot{\Theta}_2^2 \cos(\Theta_2 - \Theta_1)) \right] = \\ & = \left(P_D + \frac{1}{2} P_T + \frac{1}{2} q l + R_{DZ} + \frac{1}{2} R_{TZ} \right) \cos \varphi_1 - \\ & - \frac{c_{en} s_1}{12} \left[6V_{CXY}^2 \sin^2 \varphi_1 \sin^2(\Psi + \Theta_1) + 8V_{CXY} s_1 \dot{\varphi}_1 \sin(\Psi + \Theta_1) + 3s_1^2 \dot{\varphi}_1^2 + 6\dot{z}_c^2 \cos^2 \varphi_1 + \right. \\ & \left. + 12V_{CXY} \dot{z}_c \sin \varphi_1 \cos \varphi_1 \sin(\Psi + \Theta_1) + 8\dot{z}_c \dot{\varphi}_1 s_1 \cos \varphi_1 \right] + \\ & + \sin \varphi_1 \left[\left(R_{DX} + \frac{1}{2} R_{TX} \right) \sin \Theta_1 + \left(R_{DY} + \frac{1}{2} R_{TY} \right) \cos \Theta_1 \right] \end{aligned} \quad (1)$$

$$m_T \left\{ \begin{aligned} & \left(\ddot{\varphi}_2 + \Theta_2^2 \cos \varphi_2 \sin \varphi_2 \right) s_2 + \left[\sin \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 \cos (\Theta_2 - \Theta_1) \right] \ddot{s}_1 + \\ & + 2\dot{s}_1 \dot{\varphi}_1 \left[\cos \varphi_1 \cos \varphi_2 + \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 \cos (\Theta_2 - \Theta_1) \right] - 2\dot{s}_1 \dot{\Theta}_1 \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 \sin (\Theta_2 - \Theta_1) + \\ & + \dot{s}_1 \ddot{\varphi}_1 \left[\cos \varphi_1 \cos \varphi_2 + \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 \cos (\Theta_2 - \Theta_1) \right] + \dot{s}_1 \dot{\varphi}_1^2 \left[\cos \varphi_1 \sin \varphi_2 \cos (\Theta_2 - \Theta_1) - \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 \right] + \\ & + s_1 \dot{\varphi}_1 \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 \left[\sin (\Theta_2 - \Theta_1) + \cos (\Theta_2 - \Theta_1) \right] + \ddot{z}_c \cos \varphi_2 + \dot{V}_{CXY} \sin \varphi_2 \sin (\Psi + \Theta_2) + \\ & + V_{CXY} \dot{\Psi} \sin \varphi_2 \cos (\Psi + \Theta_2) \end{aligned} \right\} =$$

$$= R_{TX} \sin \varphi_2 \sin \Theta_2 + R_{TY} \sin \varphi_2 \cos \Theta_2 + (R_{TZ} + P_T) \cos \varphi_2$$

(2)

$$\begin{aligned} & \left(m_D + \frac{1}{2} m_T + \frac{\mu l}{3} \right) \left(\ddot{\Theta}_1 \cos \varphi_1 - 2\dot{\Theta}_1 \dot{\varphi}_1 \sin \varphi_1 \right) \cdot s_1 - \\ & - \left(m_D + \frac{1}{2} m_T + \mu l \right) \left(2\dot{s}_1 \dot{\Theta}_1 \cos \varphi_1 + \dot{V}_{CXY} \cos (\Psi + \Theta_1) - V_{CXY} \dot{\Psi} \sin (\Psi + \Theta_1) \right) - \\ & - m_T s_2 \left[\begin{aligned} & \sin (\Theta_2 - \Theta_1) \left[\ddot{\varphi}_2 \sin \varphi_2 + \cos \varphi_2 \left(\dot{\varphi}_1^2 + \dot{\Theta}_2 \right) \right] \sin (\Theta_2 - \Theta_1) + \\ & + 2 \left(\dot{\varphi}_2 \dot{\Theta}_2 \sin \varphi_2 - \ddot{\Theta}_2 \cos \varphi_2 \right) \cos (\Theta_2 - \Theta_1) \end{aligned} \right] = \end{aligned} \tag{3}$$

$$= \left(R_{DY} + \frac{1}{2} R_{TY} \right) \sin \Theta_1 - \left(R_{DX} + \frac{1}{2} R_{TX} \right) \cos \Theta_1 -$$

$$- \frac{c_{en} s_1}{12} \left[6V_{CXY}^2 \cos^2 (\Psi + \Theta_1) - 8V_{CXY} s_1 \dot{\Theta}_1 \cos (\Psi + \Theta_1) + 3s_1^2 \dot{\Theta}_1^2 \cos \varphi_1 \right]$$

$$m_T \left\{ \begin{aligned} & \left(\ddot{\Theta}_2 \cos \varphi_2 - 2\dot{\Theta}_2 \dot{\varphi}_2 \sin \varphi_2 \right) s_2 + \left[\left(2\dot{s}_1 \dot{\varphi}_1 + s_1 \ddot{\varphi}_1 \right) \sin \varphi_1 + \left(s_1 \dot{\varphi}^2 - \dot{s}_1 \right) \cos \varphi_1 \right] \sin (\Theta_2 - \Theta_1) + \\ & + \left[\left(\dot{s}_1 \dot{\Theta}_1 + s_1 \ddot{\Theta}_1 \right) \cos \varphi_1 - 2s_1 \dot{\varphi}_1 \dot{\Theta}_1 \sin \varphi_1 \right] \cos (\Theta_2 - \Theta_1) + V_{CXY} \Psi \sin (\Psi + \Theta_2) - \dot{V}_{CXY} \cos (\Psi + \Theta_2) \end{aligned} \right\} = \tag{4}$$

$$= R_{TY} \sin \Theta_2 - R_{TX} \cos \Theta_2$$

$$M_1 \ddot{s}_1 + M_2 \dot{s}_1 - \left[m_D + \frac{1}{2} (m_T + \mu l) \right] \left(\dot{\varphi}_1^2 + \dot{\Theta}_1^2 \cos^2 \varphi_1 \right) s_1 +$$

$$+ \frac{1}{2} m_T s_2 \left\{ \begin{aligned} & \ddot{\varphi}_2 \left[\sin \varphi_1 \cos \varphi_2 - \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 \cos (\Theta_2 - \Theta_1) \right] - \\ & - \dot{\varphi}_2^2 \left[\sin \varphi_1 \sin \varphi_2 + \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos (\Theta_2 - \Theta_1) \right] - \\ & - \dot{\Theta}_1 \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \sin (\Theta_2 - \Theta_1) - \\ & - \dot{\Theta}_2^2 \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos (\Theta_2 - \Theta_1) + \\ & + 2\dot{\varphi}_2 \dot{\Theta}_2 \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 \sin (\Theta_2 - \Theta_1) \end{aligned} \right\} +$$

$$+ \left(m_D + \frac{1}{2} m_T + \mu l \right) \left[\begin{aligned} & \ddot{z}_c \sin \varphi_1 - V_{CXY} \cos \varphi_1 \sin (\Theta_1 + \varphi_1) - \\ & - V_{CXY} \dot{\Psi} \cos \varphi_1 \cos (\Theta_1 + \Psi) \end{aligned} \right] = \tag{5}$$

$$= \left(P_D + \frac{1}{2} P_T + ql + 0,5R_{TZ} + R_{DZ} \right) \sin \varphi_1 - \left[\left(R_{DX} + 0,5R_{TX} \right) \sin \Theta_1 + \left(R_{DY} + 0,5R_{TY} \right) \cos \Theta_1 \right] \cos \varphi_1 -$$

$$- c_{\sigma\tau} s_1 \left[\dot{s}_1 - V_{CXY} \sin (\Psi + \Theta_1) \cos \varphi_1 + \dot{z}_c \sin \varphi_1 \right]^2 - \frac{M_{KP}}{r}$$

где m_D, m_T – приведенные массы распорной доски и трала, кг; l – длина ваера, м; d – диаметр ваера, м; μ – масса единицы длины ваера, кг/м;

q – вес в воде единицы длины ваера, Н/м;

$c_{90} = c_{90} \frac{\rho d}{2}, c_{90} = c_0 \frac{\rho d}{2}$ – коэффициенты нормального и касательного сопротивления ваера, Нс²/м³; c_{90}, c_0 – коэффициенты гидродинамического сопротивления ваера расположенного перпендикулярно и параллельно вектору скорости набегающего потока;

ρ – плотность воды, кг/м³; \dot{z}_D, \dot{z}_T – скорости вертикального перемещения распорной доски и трала, м/с; v_D, v_T – скорости распорной доски и трала относительно воды, м/с;

$R_D = c_D v_D^2$ – сила сопротивления распорной доски, $R_T = c_T v_T^2$ – сила сопротивления трала; s_2 – длина кабелей, м, P_D, P_T – вес в воде распорной доски и трала, Н;

$$M_1 = m_D + \frac{1}{2} m_T + \frac{I_0 + \mu L r_0^2 + \frac{\mu d}{2\pi n} (L^2 - l^2)}{r^2};$$

$$M_2 = \frac{d \left(M_1 - \mu l - m_D - \frac{1}{2} m_T \right)}{2\pi n r^2};$$

величины приведенных масс, I_0 – приходящийся на один ваер приведенный момент инерции барабана ваерной лебедки, кг м²;

n – количество рядов ваера, намотанных на барабан в одном слое;

L – канатоемкость барабана ваерной лебедки, м;

r_0 – радиус барабана ваерной лебедки, м;

$r = \sqrt{r_0^2 + \frac{d}{\pi n} (L - l)}$ – текущий радиус намотки ваера на барабан, м;

M_{KP} – крутящий момент на барабане лебедки.

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТРАЛОВОЙ СИСТЕМЫ К ВИДУ УДОБНОМУ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СИСТЕМЕ АВТОМАТИЗАЦИИ

Как показано в [2] приведенная система уравнений достаточно громоздка и сложна даже для численного интегрирования. В связи с этим необходимо про-

извести анализ структуры уравнений с целью их упрощения.

При составлении математической модели траловой системы требуется определить кинетическую энергию элементов системы. В силу больших массогабаритных показателей самым существенный вклад в определение кинетической энергии вносит трал, энергия которого пропорциональна квадрату его скорости. Скорость трала, как видно из рис. 1 и формул (1-5), складывается из поступательной скорости точки Д и скорости вращения трала вокруг оси, проходящей через эту точку. Учитывая очень незначительную величину последней составляющей скорости будем считать скорость трала равной скорости движения распорных досок. Данное допущение приводит к тому, что скорость трала перестает зависеть от обобщенных координат φ_2 и Θ_2 и обобщенных скоростей $\dot{\varphi}_2$ и $\dot{\Theta}_2$. Следовательно, производные кинетической энергии по указанным обобщенным координатам и скоростям будут равны нулю. Применение данного подхода к уравнениям (1) – (5) позволит в уравнения (1) и (3) избавиться от слагаемых пропорциональных $m_T s_2$, а левые части уравнений (2) и (4) приравнять к нулю.

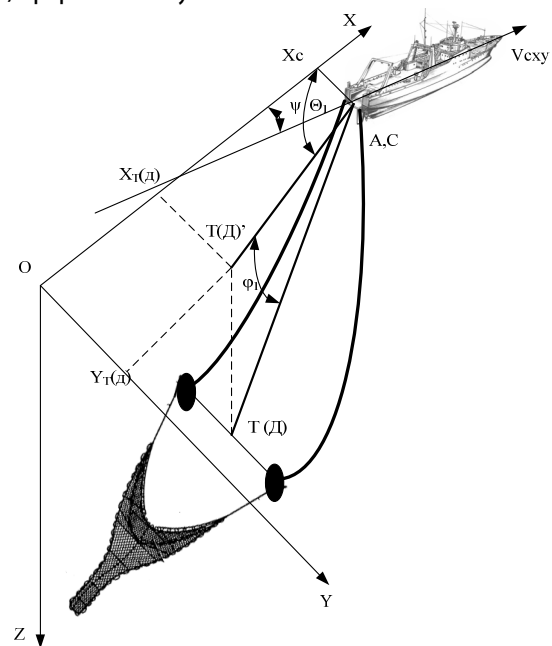


Рисунок 2 – Одноствержневая схематизация судна с тралом

Использование данного допущения позволяет осуществить переход от шарнирной системы стержней ваер – кабель к одноименной жесткой системе. В дальнейшем целесообразно осуществить «стягивание» трала (точка Т) и досок (точка Д) в одну точку и использовать одностержневую схематизацию траловой системы (рис. 2). Указанное допущение позволяет считать $s_2 = 0$. При этом число степеней свободы системы сокращается до трех: Θ_1, φ_1, s_1 .

$$\begin{aligned} & \left(m_D + \frac{1}{2} m_T + \frac{\mu l}{3} \right) (\ddot{\varphi}_1 + \Theta_1^2 \cos \varphi_1 \sin \varphi_1) \cdot s_1 + \\ & + \left(m_D + \frac{1}{2} m_T + \frac{\mu l}{2} \right) \left(2\dot{s}_1 \dot{\varphi}_1 + \left(V_{CXY} \sin(\Psi + \Theta_1) + \dot{\Psi} V_{CXY} \sin(\Psi + \Theta_1) \right) \sin \varphi_1 \right) = \\ & = \left(P_D + \frac{1}{2} P_T + \frac{1}{2} ql + R_{DZ} + \frac{1}{2} R_{TZ} \right) \cos \varphi_1 - \\ & - \frac{c_{en} s_1}{12} \left[6V_{CXY}^2 \sin^2 \varphi_1 \sin^2(\Psi + \Theta_1) + 8V_{CXY} s_1 \dot{\varphi}_1 \sin(\Psi + \Theta_1) + 3s_1^2 \dot{\varphi}_1^2 \right] + \\ & + \sin \varphi_1 \left[\left(R_{DX} + \frac{1}{2} R_{TX} \right) \sin \Theta_1 + \left(R_{DY} + \frac{1}{2} R_{TY} \right) \cos \Theta_1 \right] \\ & \left(m_D + \frac{1}{2} m_T + \frac{\mu l}{3} \right) (\ddot{\Theta}_1 \cos \varphi_1 - 2\dot{\Theta}_1 \dot{\varphi}_1 \sin \varphi_1) \cdot s_1 - \\ & - \left(m_D + \frac{1}{2} m_T + \mu l \right) \left(2\dot{s}_1 \dot{\Theta}_1 \cos \varphi_1 + \dot{V}_{CXY} \cos(\Psi + \Theta_1) - V_{CXY} \dot{\Psi} \sin(\Psi + \Theta_1) \right) = \\ & = \left(R_{DY} + \frac{1}{2} R_{TY} \right) \sin \Theta_1 - \left(R_{DX} + \frac{1}{2} R_{TX} \right) \cos \Theta_1 - \\ & - \frac{c_{en} s_1}{12} \left[6V_{CXY}^2 \cos^2(\Psi + \Theta_1) - 8V_{CXY} s_1 \dot{\Theta}_1 \cos(\Psi + \Theta_1) + 3s_1^2 \dot{\Theta}_1^2 \cos \varphi_1 \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & M_1 \ddot{s}_1 - \left[m_D + \frac{1}{2} (m_T + \mu l) \right] (\dot{\varphi}_1^2 + \dot{\Theta}_1^2 \cos^2 \varphi_1) s_1 + \\ & + \left(m_D + \frac{1}{2} m_T + \mu l \right) \left[\begin{aligned} & -V_{CXY} \cos \varphi_1 \sin(\Theta_1 + \varphi_1) - \\ & -V_{CXY} \dot{\Psi} \cos \varphi_1 \cos(\Theta_1 + \Psi) \end{aligned} \right] = \\ & = \left(P_D + \frac{1}{2} P_T + ql + 0,5 R_{TZ} + R_{DZ} \right) \sin \varphi_1 - \left[\left(R_{DX} + 0,5 R_{TX} \right) \sin \Theta_1 + \left(R_{DY} + 0,5 R_{TY} \right) \cos \Theta_1 \right] \cos \varphi_1 - \\ & - c_{et} s_1 \left[\dot{s}_1 - V_{CXY} \sin(\Psi + \Theta_1) \cos \varphi_1 \right]^2 - \frac{M_{KP}}{r} \end{aligned}$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛ СОПРОТИВЛЕНИЯ ВОДЫ ДВИЖЕНИЮ ТРАЛОВОЙ СИСТЕМЫ

Силы сопротивления воды движению элементов траловой системы входят в правые части полученных уравнений и представляют собой неинерционные составляющие. Необходимо определить составляющие сил сопротивления трала, досок и ваера.

Расчет сил сопротивления канатно-сетной части трала и распорных досок базируется на данных экспе-

При разработке системы автоматизации на определенном этапе можно пренебречь влиянием вертикальных перемещений судна, вызванных качкой на волнении. Таким образом упрощая уравнения (1) - (5) можно считать равными нулю все слагаемые, которые содержат производные \dot{z}_c и \ddot{z}_c .

Принимая указанные упрощения можно привести систему уравнений (1) - (5) к системе с тремя обобщенными координатами Θ_1, φ_1, s_1 :

риментов, проведенных с орудиями лова и их моделями. В ряде источников [3,4] сопротивление трала и распорной доски принимается в виде квадратичной зависимости от скорости:

$$R_T = c_T \frac{\rho V_T^2}{2} F_T, \quad R_D = c_D \frac{\rho V_D^2}{2} F_D$$

где c_T, c_D - коэффициент гидродинамического сопротивления канатно-сетной оболочки трала и распорных досок; ρ - плотность воды; V_T, V_D - скорости

движения траля и доски; F_T - площадь ниток сетной части траля, F_D - площадь доски.

По принятой схематизации траля (симметрия системы относительно ДП судна) силы сопротивления можно представить в виде векторной суммы двух составляющих R_{TX} , R_{TZ} и R_{DX} , R_{DZ} .

Площадь распорных досок являются основными характеристиками траля и приводятся в соответствующих каталогах и паспортах.

С учетом неоднородности тралевой оболочки по диаметру ниток и канатов, шагу ячеи площадь ниток и канатов F_T рассчитывается по формуле [4]:

$$F_T = \sum_{i=1}^n \left(F_{\Phi_i} \frac{d_{ci}}{a_{ci}} \right) + \sum_{j=1}^n (d_{kj} \cdot a_{kj} \cdot N_{kj}),$$

где F_{Φ_i} - фиктивная площадь i -й однородной сетной пластины, вычисляемая как произведение ее линейных размеров в жгуте;

d_{ci} - диаметр нитки в i -й однородной сетной пластине;

a_{ci} - шаг ячеи в i -й однородной сетной пластине;

$$c_T = \left(1 - \frac{f \cdot d}{a} \right) \left\{ k_d \cdot c_{n90} \left[u_x^3 + \sin^3 \alpha (1 - u_x^3) \right] + c_{n0} (1 - \sin^3 \alpha) (1 - u_x^3) \right\} + \frac{\pi \cdot k_f \cdot c_f \cdot f^2 \cdot d}{8a},$$

где c_{n90} - коэффициент сопротивления нитки, расположенной перпендикулярно к направлению ее движения;

u_x - посадочный коэффициент сети в поперечном направлении к вектору скорости ее движения;

α - угол атаки плоскости ячеи относительно вектора скорости ее движения;

c_{n0} - коэффициент сопротивления нитки, расположенной параллельно к направлению ее движения;

a - шаг ячеи;

d - диаметр нитки;

f - отношение диаметра узла к диаметру нитки;

$c_f = 0,5 + \frac{\sin \alpha}{2}$ - коэффициент сопротивления узла;

$$k_d = \sin \alpha + 0,185 \cdot \ln \frac{a \cdot u_y - d}{d} \quad \text{- коэффициент,}$$

учитывающий взаимное влияние ниток;

n - число однородных пластин, составляющих сетную часть траля;

d_{kj} - диаметр каната в j -й однородной пластине;

a_{kj} - шаг ячеи в j -й однородной канатной пластине;

N_{kj} - число канатных элементов в j -й однородной канатной пластине;

m - число однородных пластин, составляющих канатную часть траля.

Сущность проблемы расчета величин сил сопротивления сводится к определению коэффициентов гидродинамического сопротивления. Указанной проблеме посвящен ряд работ М.М. Розенштейна, А.А. Недоступа [4], А.Л. Обвинцева [5] и др. Авторы использовали различные подходы к решению задачи.

В работе [5] использовались методы расчета коэффициента сопротивления тралевой сети через значения коэффициентов сопротивления составляющих ее ниток и узлов. А.Л. Обвинцевым получена эмпирическая формула для расчета коэффициента

$$k_f = \sin \alpha + 0,185 \cdot \ln \frac{2a \cdot u_y - d \cdot f}{d \cdot f} \quad \text{- коэффициент,}$$

учитывающий взаимное влияние узлов;

u_y - посадочный коэффициент сети в направлении вектора скорости ее движения.

Недостатком данного метода расчета является то, что он базируется на рассмотрении тралевой оболочки как регулярного набора ячеи заданной правильной формы. В реальных условиях эксплуатации траля это условие не соблюдается.

Известен ряд эмпирических формул для расчета коэффициента сопротивления, полученных непосредственно по результатам экспериментов с тралями или их моделями. В работах В.П. Карпенко [6] получена формула для расчета коэффициента сопротивления донного траля

$$c_T = (0,432 - 0,595 \cdot 10^{-4} \cdot \text{Re}) \lambda^{0,25},$$

где λ - отношение величины горизонтального раскрытия сетной части траля к длине подборы.

Приведенная формула получена для условий работы трала при $Re = 7 \cdot 10^2 \div 3,5 \cdot 10^3$.

Аналогичным образом определяет коэффициента сопротивления разноглубинного трала В.А.Белов [7]

$$c_T = 0,335 + \ln(u^{0,144} \cdot C^{0,1336}) + 0,884\lambda - 1,437\lambda^2 + 0,735\lambda^3,$$

где C – коэффициент, характеризующий цикл кроа сети и выраженный через угол ее уклона.

Т.В. Рязановой в работе [8] в результате методики идентификации эксплуатационно-технических характеристик (ЭТХ) тралов, которая основывается на обработке факторных экспериментальных данных приведена формула для расчета сопротивления трала

$$R_T = 0,00355L + 7,31V + 0,046M - 11,1,$$

где L – длина вытравленных ваеров, V – скорость траления, M – масса грузов углубителей на одно крыло.

Рядом исследователей было показано, что в общем случае коэффициент сопротивления трала определяется зависимостью.

$$c_T = f(F_0, \alpha)$$

Расчет относительной площади сети, как правило не вызывает затруднений и выполняется по формуле [4]

$$F_o = \frac{d}{a} \frac{1}{u_x u_y},$$

где a – средневзвешенное значение шага ячеи; d – средневзвешенное значение диаметра нитки; u_x – средневзвешенное значение горизонтального коэффициента посадки (раскрытия ячеи); u_y – средневзвешенное значение вертикального коэффициента посадки (раскрытия ячеи).

Наибольшие трудности вызывает определение значения угла атаки α , составляемый меридианом сетной оболочки с направлением движения трала.

М.М. Розенштейном [4] было предложено оценивать значение угла α отношением $\frac{F_y}{F_\phi}$, в котором F_y ,

– площадь устья трала, вычисляемая как произведение его вертикального и горизонтального раскрытия, F_ϕ – фиктивная площадь сетной части трала. Автором проводились экспериментальные работы с разноглубинными тралами и их моделями в диапазоне условий $Re = 5 \cdot 10^2 \div 10^4$ и $F_0 = 0,05 \div 0,08$. Полученные экспериментальные данные аппроксимированы выражением

$$c_T = 0,04 + 4,25 \frac{F_y}{F_\phi} - 16,2 \left(\frac{F_y}{F_\phi} \right)^2.$$

Методы расчета значений коэффициентов сопротивления для траловых досок отсутствуют [4]. Имеющиеся немногочисленные исследования посвящены определению гидродинамических коэффициентов сопротивления для плоских и овальных профилей без учета большого числа деталей арматуры трала, влияние которых существенно.

Поэтому основным методом определения значения гидродинамических коэффициентов распорных досок в зависимости от угла атаки является проведение экспериментов с последующей обработкой результатов. Для каждой конструкции тралового распорного устройства необходимые сведения приведены в соответствующих справочниках [6].

ЛИТЕРАТУРА:

1. Al'tshul' B.A. Dinamika tralovojj sistemy / B.A. Al'tshul', A.L. Fridman. Moskva, Agropromizdat, 1990 g. – 240 s.
2. Golikov S.P. Matematicheskoe modelirovanie ehlementov tralovogo kompleksa / S.P. Golikov, N.V. Ivanovskij, S.G. Chernyj, N.P. Smetjukh, O.S. Skidan // Vodnij transport. Zbirnik naukovikh prac' Kiivs'koi derzhavnoi akademii vodnogo transportu imeni get'mana Petra Konashevicha-Sagajdachnogo. K.:KDAVT,2013,№2(17) – s. 181-190.
3. Sbornik zadach i uprazhnenij po teorii i proektirovaniju orudij promyshlennogo rybolovstva / A.L. Fridman, M.M. Rozenshtejn. – M.: Agropromizdat, 1987. – 256 s.
4. Rozenshtern, M.M. Mekhanika orudij rybolovstva: uchebnik dlja vuzov/M.M. Rozenshtejn, A.A. Nedo-stup. – M.:MORKNIGA, 2011, - 528 s. il.
5. Obvincev A.L. Soprotivlenie i raspornaja sila ploskoj seti iz odnorodnoj, dvojnoj i trojnoj nitki // Promyshlennoe rybolovstvo: Sb. nauchn. trudov / Kaliningradskij gos. tekh. universitet – Kalinigrad, 11994 g. – s. 17-19
6. Karpenko, V. P. Ustrojstva raskrytija rybolovnykh tralov: proektirovanie i ehkspluatacija [Tekst] / V. P. Karpenko, A. L. Fridman. - M. : Pishhevaja promyshlennost', 1980. - 248 s.
7. Buksiruemye orudija lova [Tekst] / V. A. Belov, V. K. Korotkov, S. L. Shimjanskij, V. K. Savrasov. - M. : Agropromizdat, 1987. - 199,2 s.
8. Rjzanova, T. V. Povyshenie ehffektivnosti promyslovoj ehkspluatcii traulerov na osnove fak-tornogo analiza ikh tjad [Tekst] : avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenojj stepeni kand. tekhn. nauk :05.18.17 / T. V. Rjzanova. - Kalinigrad, 2011. - 23 s.