

# 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

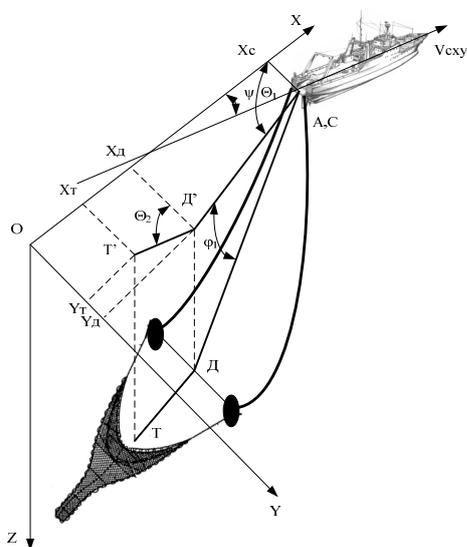


Рисунок 1 – Схематизация пространственного движения траловой системы

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  $\varphi_1$  между стержнем ваера АД и его проекцией АД' на горизонтальную плоскость, углом  $\varphi_2$  между стержнем ваера ДТ

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

и его проекцией ДТ' на горизонтальную плоскость, углом  $\Theta_1$  между проекцией АД' и осью OY, углом  $\Theta_2$  между проекцией ДТ' и осью OX, 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:

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

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

(2)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

где  $m_D, m_T$  – приведенные массы распорной доски и трала, кг;  $l$  – длина ваера, м;  $d$  – диаметр ваера, м;  $\mu$  – 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, Нс<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>;  $c_{90}, c_0$  – коэффициенты гидродинамического сопротивления ваера расположенного перпендикулярно и параллельно вектору скорости набегающего потока;

$\rho$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $\dot{z}_D, \dot{z}_T$  – 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 м<sup>2</sup>;

$n$  – 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  $\varphi_2$  и  $\Theta_2$  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.

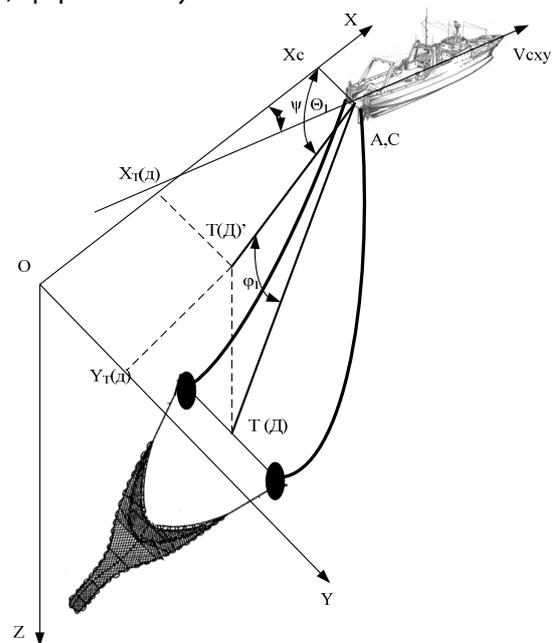


Рисунок 2 – Одноствержневая схематизация судна с тралом

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:  $\Theta_1, \varphi_1, s_1$ .

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

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

#### 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-

риентов, 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;  $\rho$  - плотность воды;  $V_T, V_D$  - скорости

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

По принятой схематизации трала (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 тралов и приводятся в соответствующих каталогах и паспортах.

С учетом неоднородности траловой 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  $F_{\Phi_i}$  - 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;

$\alpha$  - 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 трала;

$d_{kj}$  - 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 трала.

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 траловой 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 траловой оболочки как регулярного набора ячеи заданной правильной формы. В реальных условиях эксплуатации тралов это условие не соблюдается.

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

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

где  $\lambda$  - отношение величины горизонтального раскрытия сетной части трала 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  $\alpha$ , составляемый меридианом сетной оболочки с направлением движения трала.

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

– площадь устья трала, вычисляемая как произведение его вертикального и горизонтального раскрытия,  $F_\phi$  – 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.