

ПРОМРЫБОЛОВСТВО

УДК 639.2.081.117

В.И. Габрюк¹, В.В. Кудакаев¹, Л.А. Габрюк², А.Н. Бойцов^{1*}

¹ Дальневосточный государственный технический
рыбохозяйственный университет,
690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б;

² Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского,
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ОСНАСТКИ
РАЗНОГЛУБИННЫХ ТРАЛОВ

Приведены общая математическая модель оснастки разноглубинных тралов и методика определения параметров траловых досок, гидродинамических щитков, а также распределенных по нижней подборе грузов и сосредоточенных грузов (грузов-углубителей), обеспечивающих проектные горизонтальное и вертикальное раскрытия устья трала при тралении на любых глубинах. Отличительной особенностью предлагаемой методики моделирования оснастки тралов является системный подход: трал, траловые доски, ваеры рассматриваются как единый комплекс.

Ключевые слова: устье трала, горизонтальное и вертикальное раскрытие, траловая доска, гидродинамический щиток, сосредоточенные и распределенные грузы, моделирование, математические модели.

DOI: 10.26428/1606-9919-2018-195-244-252.

Gabruk V.I., Kudakaev V.V., Gabruk L.A., Boitsov A.N. Method of rigging parameters calculation for midwater trawls // Izv. TINRO. — 2018. — Vol. 195. — P. 244–252.

The rigging parameters calculation for midwater trawls are discussed with description of numerical model for calculating the parameters of trawl boards, hydrodynamic kites, and dispersed and concentrated weights which provide the designed values of horizontal and vertical opening of the trawl mouth. A distinctive feature of the proposed technique is a systematic approach: the trawl, trawl boards, and wires are considered as a joint complex.

Key word: trawl mouth, trawl opening, trawl board, hydrodynamic kite, trawl weights, modeling of trawl, numerical model.

Введение

Уловистость разноглубинного трала зависит от его конструкции, горизонтального B_v и вертикального H_v раскрытия устья и скорости траления. Горизонтальное раскрытие устья трала обеспечивается траловыми досками, а вертикальное — оснасткой верхней

* Габрюк Виктор Иванович, доктор технических наук, профессор, руководитель научной школы, e-mail: gabrukvi@rambler.ru; Кудакаев Василий Владимирович, кандидат технических наук, доцент, e-mail: kudakaev_v@mail.ru; Габрюк Людмила Александровна, кандидат технических наук, доцент, e-mail: zdorova2003@rambler.ru; Бойцов Анатолий Николаевич, кандидат технических наук, доцент, e-mail: boitsov_an@mail.ru.

Gabruk Victor I., D.Sc., professor, director of computer center, e-mail: gabrukvi@rambler.ru; Kudakaev Vasily V., Ph.D., senior lecturer, e-mail: kudakaev_v@mail.ru; Gabruk Lyudmila A., Ph.D., senior lecturer, e-mail: zdorova2003@rambler.ru; Boitsov Anatoly N., Ph.D., senior lecturer, e-mail: boitsov_an@mail.ru.

подборы гидродинамическими щитками, нижней подборы — распределенными и сосредоточенными грузами (рис. 1).

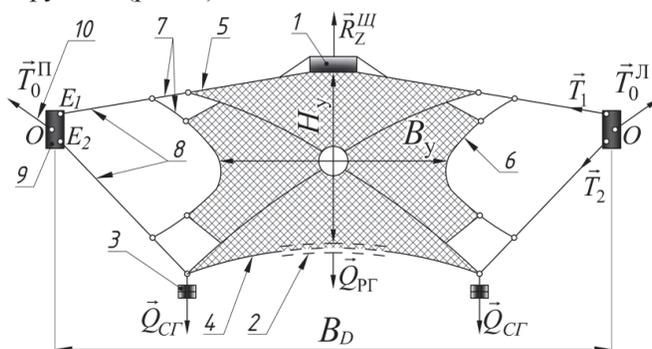


Рис. 1. Разноглубинный канатный трал (вид спереди): 1 — оснастка верхней подборы (гидродинамический щиток, ГДЩ); 2 — оснастка нижней подборы распределенным грузом (якорные цепи); 3 — оснастка нижней подборы сосредоточенными грузами (грузы-углубители); 4 — нижняя подбора; 5 — верхняя подбора; 6 — боковая подбора; 7 — голые концы верхней и боковой подбор; 8 — кабели; 9 — траловая доска; 10 — ваер

Fig. 1. Midwater trawl (front view): 1 — headline rigging (hydrodynamic kite); 2 — footrope rigging with dispersed weights (anchor chains); 3 — footrope rigging with concentrated weights; 4 — footrope; 5 — headline; 6 — siderope; 7 — legs of the headline and sideline; 8 — bridles; 9 — trawl board; 10 — warp

Первые попытки моделирования оснастки разноглубинных тралов представлены в работе Ф.И. Баранова (1960). В дальнейшем на Дальневосточном бассейне подробные теоретические и экспериментальные исследования параметров оснастки разноглубинных тралов выполнены группой исследователей Дальрыбвтуза и ТИНРО под руководством профессора В.И. Габрюка (Шевченко, Бойцов, 1983; Бойцов, Астафьев, 1983; Габрюк и др., 2008; Габрюк, 2011, 2016; Осипов и др., 2011). Эти исследования выполнены при условии равенства натяжений верхнего и нижнего кабелей. Общее же решение данной задачи до последнего времени отсутствовало. В данной работе предложена математическая модель расчета всех элементов оснастки трала (гидродинамических щитков, распределённых и сосредоточенных грузов, кабелей и траловых досок) для общего случая, когда на натяжение верхнего и нижнего кабелей не накладывается никаких ограничений. Отличительной особенностью данной работы является системный подход: все элементы оснастки входного устья трала рассматриваются в рамках единой траловой системы.

Материалы и методы

Объектом исследования является оснастка трала: верхней подборы — гидродинамическими щитками, нижней — распределенными и сосредоточенными грузами, а также траловыми досками.

Задача заключается в определении площади траловой доски в плане S , ее веса в воде Q_Z^D и массы M_D ; вертикальной гидродинамической силы щитка R_Z^{III} ; веса в воде равномерно распределенного по нижней подборе груза Q_Z^{PG} и его массы M_{PG} ; веса в воде сосредоточенных грузов $2Q_Z^{CR}$ и их массы $2M_{CR}$ для обеспечения проектного горизонтального B_y и вертикального H_y раскрытия устья разноглубинного трала при тралении на заданной глубине.

Результаты и их обсуждение

Раскрытие устья трала (рис. 1) зависит от его сопротивления R_X^T и вертикальной гидродинамической силы R_Z^T :

$$R_X^T = R_X^{CO} + R_X^{III} + R_X^K, (X, Z), \quad (1)$$

где $R_X^{CO}, R_X^{III}, R_X^K$ — сопротивления сетной оболочки, щитка и кабелей; (X, Z) — символ круговой перестановки индексов.

Сопrotивление сетной оболочки тpала R_X^{CO} определяется по формуле Ньютона

$$R_X^{CO} = C_X^{CO} \frac{\rho V^2}{2} S_H^{(-)}, \quad (2)$$

где ρ — плотность морской воды; V — скорость тpаления; $S_H^{(-)}$ — затененная площадь сетной оболочки тpала без учета ячей, забираемых в шворочный шов; C_X^{CO} — коэффициент гидродинамического сопrotивления сетной оболочки тpала, определяемый по эмпирической формуле Жукова-Лунина (Жуков, Лунин, 1976):

$$C_X^{CO} = 0,07 + 3,60 S_Y/S_\phi^{(-)}, \quad S_Y/S_\phi^{(-)} \in (0,02 - 0,06). \quad (3)$$

Здесь S_Y — площадь устья тpала; $S_\phi^{(-)}$ — фиктивная площадь сетной оболочки тpала без учета ячей, забираемых в шворочный шов.

Если устье в процессе тpаления имеет форму, близкую к прямоугольнику, то

$$S_Y = H_Y B_Y. \quad (4)$$

Если форма устья тpала близка к эллипсу, то:

$$S_Y = \pi H_Y B_Y / 4 = 0,785 H_Y B_Y. \quad (5)$$

Для определения вертикальной гидродинамической силы щитка R_Z^{III} необходимо знать сопrotивления его верхней пласти R_X^{BIII} и кабелей R_X^K . Если все пласти тpала одинаковы, то сопrotивления его верхней, нижней R_X^{HIII} и боковой R_X^{BIII} пластей определяются по формуле

$$R_X^{BIII} = R_X^{HIII} = R_X^{BIII} = R_X^{CO} / 4. \quad (6)$$

Для тpалов с разными пластиами принимаем, что коэффициент сопrotивления для всех пластей одинаковый и такой, как у всего тpала (3). В этом случае сопrotивления верхней, нижней и боковой пластей определяются по формуле

$$R_X^{BIII} = C_X^{CO} \frac{\rho V^2}{2} S_H^{BIII(-)} = 0,07 + 3,60 S_Y/S_\phi^{(-)} \frac{\rho V^2}{2} S_H^{BIII(-)}, \quad (B, H, B), \quad (7)$$

где (B, H, B) — символ круговой перестановки индексов; $S_H^{BIII(-)}$ — затененная площадь верхней пласти тpала без учета ячей, забираемых в шворочный шов.

Сопrotивление кабелей R_X^K равно сумме:

$$R_X^K = 2R_X^{BK} + 2R_X^{HK}, \quad (X, Z). \quad (8)$$

Здесь (X, Z) — символ круговой перестановки индексов; R_X^{BK}, R_X^{HK} — сопrotивления верхнего и нижнего кабелей:

$$R_X^{BK} = C_X^{BK} \frac{\rho V^2}{2} d_{K^B}^{B^B}, \quad (B, H), \quad (9)$$

где (B, H) — символ круговой перестановки индексов; $d_{K^B}^{B^B}$ — диаметр и длина верхнего кабеля; C_X^{BK} — коэффициент сопrotивления верхнего кабеля:

$$C_X^{BK} = 0,449 \sin^2 \alpha_K^B + 0,550 \sin^4 \alpha_K^B + 0,023 \cos^2 \alpha_K^B, \quad (B, H). \quad (10)$$

Здесь α_K^B, α_K^H — угол атаки верхнего и нижнего кабелей:

$$\cos \alpha_K^B = \cos v_K^B \cos \theta_K^B, \quad (B, H), \quad (11)$$

где $v_K^B = v_1, v_K^H = v_2$ — углы между верхним/нижним кабелем и диаметральной плоскостью тpала; $\theta_1 = \theta_K^B, \theta_2 = \theta_K^H$ — углы между плоскостью верхних/нижних кабелей и горизонтом (рис. 2).

Углы θ_K^B, θ_K^H , входящие в формулу (11), определяются следующим образом.

При треугольной схеме кабелей (рис. 2) имеем:

$$\sin \theta_K^B = h_3 / (l_{KP} + l_{ГK} + l_K^B), \quad h_3 = h_{III} - h_D, \quad (12)$$

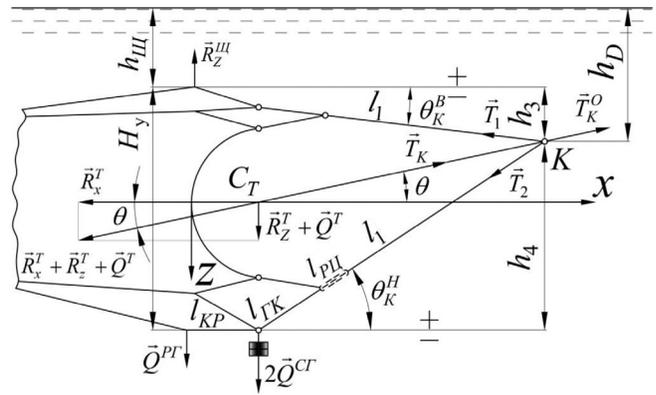
$$\sin \theta_K^H = h_4 / (l_{ГK} + l_{PЦ} + l_K^B), \quad h_4 = H_Y + h_3, \quad (13)$$

где h_{III}, h_D — глубины хода щитка и тpаловой доски; $l_{KP}, l_{ГK}, l_K^B, l_{PЦ}$ — длины крыла тpала, голого конца подборы, верхнего кабеля, регулировочной цепи нижнего кабеля:

$$l_{PЦ} = l_2 - l_1 = l_K^B (\cos v_K^B \cos \theta_K^B / (\cos v_K^H \cos \theta_K^H) - 1), \quad (14)$$

где l_1, l_2 — длина верхнего и нижнего кабелей.

Рис. 2. Треугольная схема кабелей
Fig. 2. Triangular bridles arrangement



Для обеспечения устойчивого движения трала на заданной глубине траловые доски должны двигаться на 5–10 м ниже щитка, т.е. $h_3 = -(5 - 10)$ м.

При четырехугольной схеме кабелей (рис. 3) имеем:

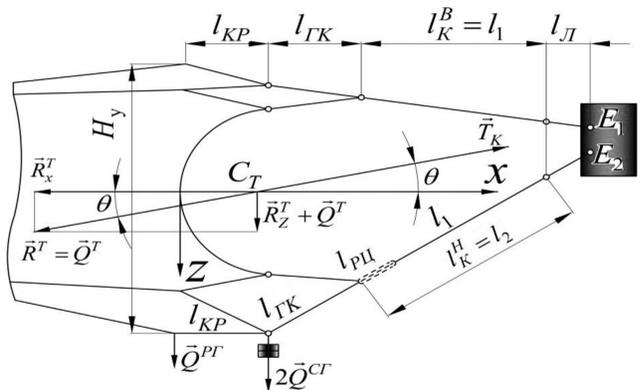
$$\sin \theta_K^B = h_3 / (l_{KP} + l_{ГK} + l_K^B + l_L), \quad h_3 = h_{III} - h_D, \quad (15)$$

$$\sin \theta_K^H = h_4 / (l_{ГK} + l_{PЦ} + l_K^B + l_L), \quad h_4 = H_y + h_3 + E_1 E_2, \quad (16)$$

где $E_1 E_2$ — расстояние между точками крепления верхней и нижней лапок к доске; l_L — длина лапок доски.

Рис. 3. Четырехугольная схема лапок доски (схема с отдельными лапками)

Fig. 3. Quadrangular arrangement of trawl board backstrops (case of separate backstrops)



Углы между одинарным/верхним/нижним кабелями и диаметральной плоскостью трала ν , ν_K^B , ν_K^H :

$$\operatorname{tg} \nu = \operatorname{tg} \alpha_N^{\circ} \cos \theta, \quad \operatorname{tg} \nu_K^B = \operatorname{tg} \alpha_N^{\circ} \cos \theta_K^B, \quad \operatorname{tg} \nu_K^H = \operatorname{tg} \alpha_N^{\circ} \cos \theta_K^H, \quad (17)$$

где θ — угол между плоскостью одинарных кабелей и горизонтом; α_N° — угол атаки боковой пласти трала в устьевом сечении.

Углы α_N° и θ определяются по формулам

$$\operatorname{tg} \alpha_N^{\circ} = (0,5B_V - 0,5D_M) / L_M \quad (18)$$

если натяжения верхнего и нижнего кабелей равны, т.е. $T_1 = T_2$, то

$$\theta = 0,5(\theta_K^B + \theta_K^H); \quad (19)$$

если натяжения верхнего и нижнего кабелей не равны, т.е. $T_1 \neq T_2$, то

$$\operatorname{tg} \theta = (Q_Z^T + R_Z^T) / |R_X^T|, \quad (20)$$

где D_M — диаметр сетной оболочки трала в районе ее соединения с траловым мешком; L_M — длина мотни трала в посадке; Q_Z^T — проекция на ось $z \downarrow \bar{g}$ веса трала в воде:

$$Q_Z^T = Q_Z^{CO} + Q_Z^{PR} + 2Q_Z^{CR} + Q_Z^K. \quad (21)$$

Здесь Q_Z^{CO} , Q_Z^{PR} , $2Q_Z^{CR}$, Q_Z^K — вес в воде сетной оболочки трала, распределенного и сосредоточенного грузов, кабелей.

Вертикальная гидродинамическая сила кабелей равна сумме

$$R_Z^K = 2R_Z^{BK} + 2R_Z^{HK}. \quad (22)$$

Здесь R_Z^{BK}, R_Z^{HK} — вертикальные гидродинамические силы верхнего и нижнего кабелей:

$$R_Z^{BK} = C_Z^{BK} \frac{\rho V^2}{2} d_K^B l_K^B, \quad (B, H), \quad (23)$$

где (B, H) — символ круговой перестановки индексов; C_Z^{BK} — коэффициент вертикальной гидродинамической силы верхнего кабеля:

$$C_Z^{BK} = C_{YV}^{BK} \sin \varphi_K^B + C_{ZV}^{BK} \cos \varphi_K^B, \quad (B, H), \quad (24)$$

где C_{YV}^{BK}, C_{ZV}^{BK} — коэффициенты боковой и подъемной сил кабеля:

$$C_{YV}^{BK} = \pm (0,035 \sin \alpha_K^B \cos \alpha_K^B + 0,140 \sin^3 \alpha_K^B \cos \alpha_K^B), \quad (B, H), \quad (25)$$

$$C_{ZV}^{BK} = - (0,244 \sin \alpha_K^B \cos \alpha_K^B + 0,650 \sin^3 \alpha_K^B \cos \alpha_K^B), \quad (B, H). \quad (26)$$

Знак (+) относится к канатам с правой свивкой наружных прядей, знак (–) — к канатам с левой свивкой.

Угол атаки α_K^B и угол крена φ_K^B плоскости потока верхнего кабеля:

$$tg \varphi_K^B = tg v_K^B / \sin \theta_K^B, \quad \sin \alpha_K^B = \sin v_K^B / \sin \varphi_K^B \quad (B, H). \quad (27)$$

Вертикальная гидродинамическая сила щитка R_Z^{III} определяется из условия равновесия верхней подборы:

$$R_Z^{III} = R_X^{BIII} (tg \alpha_N^{BIII} - tg \theta_1) - Q_Z^{BII}; \quad tg \alpha_N^{BIII} = (H_y - D_M) / 2L_M, \quad (28)$$

$$R_X^{BIII} = C_X^{CO} (0,5 \rho V^2) S_H^{BIII(-)}; \quad C_X^{CO} = - (0,07 + 3,6 S_y / S_\phi^{CO}). \quad (29)$$

Здесь α_N^{BIII} — угол атаки верхней пласти трала; θ_{II}^B — угол между плоскостью голых концов верхней подборы и горизонтом (в первом приближении $\theta_{II}^B = \theta_1$); Q_Z^{BII} — вес в воде верхней подборы:

$$Q_Z^{BII} = k_W^{BII} M^{BII} g, \quad (30)$$

где k_W^{BII} — коэффициент веса в воде верхней подборы (капрон $k_W^{BII} = 0,1$; дэнлайн $k_W^{BII} = -0,12$); M^{BII} — масса верхней подборы; g — ускорение свободного падения.

Вес в воде равномерно распределенного по нижней подборе груза определяется из условий равновесия нижней подборы:

$$Q_Z^{PG} = |R_X^{HIII}| tg \alpha_N^{HIII} - Q_Z^{HII}, \quad M_{PG} = Q_Z^{PG} / k_W^{PG} g, \quad (31)$$

$$R_X^{HIII} = C_X^{CO} (0,5 \rho V^2) S_H^{HIII(-)}, \quad tg \alpha_N^{HIII} = (H_y - D_M) / 2L_M, \quad (32)$$

где $|R_X^{HIII}|, \alpha_N^{HIII}$ — сопротивление и угол атаки нижней пласти трала; Q_Z^{HII} — вес в воде нижней подборы; M_{PG} — масса распределенного по нижней подборе груза; k_W^{PG} — коэффициент веса в воде распределенного груза ($k_W^{PG} = 0,87$ — сталь).

Вес в воде сосредоточенных грузов (грузов-углубителей) при равенстве натяжений верхнего и нижнего кабелей определяется из условий равновесия системы «трал–кабели» (рис. 4):

$$2Q_Z^{CT} = |R_X^T| tg \theta + |R_Z^T| - (Q_Z^{CO} + Q_Z^K + Q_Z^{PG}); \quad M_{CT} = Q_Z^{CT} / k_W^{CT} g, \quad (33)$$

$$R_X^T = R_X^{CO} + R_X^{III} + R_X^K; \quad R_Z^T = R_Z^{CO} + R_Z^{III} + R_Z^K, \quad \theta = (\theta_K^B + \theta_K^H) / 2, \quad (34)$$

где Q_Z^{CT}, M_{CT} — вес в воде и масса сосредоточенного груза, приходящегося на одно крыло трала; R_X^T, R_Z^T — сопротивление и вертикальная гидродинамическая сила трала; k_W^{CT} — коэффициент веса в воде материала сосредоточенных грузов.

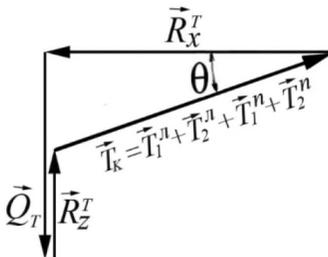


Рис. 4. Силовой многоугольник системы «трал–кабели»: \vec{T}_1^l, \vec{T}_2^l — натяжения левых кабелей; \vec{T}_1^n, \vec{T}_2^n — натяжения правых кабелей

Fig. 4. Diagram of component forces in the system «trawl–bridles»: \vec{T}_1^l, \vec{T}_2^l — left bridles tension; \vec{T}_1^n, \vec{T}_2^n — right bridles tension

Площадь траловой доски в плане S , обеспечивающая заданное горизонтальное раскрытие устья трала B_v , определяется из соотношения:

$$S = \tilde{S} R_X^T / \rho V^2. \quad (35)$$

Коэффициент \tilde{S} , входящий в формулу (35), определяется следующим образом. При треугольной схеме лапок доски (рис. 5):

$$\tilde{S} = \frac{tg \nu / \cos \theta - tg \alpha_0 \sin \varphi_0}{\left| C_{XV}^D \right| tg \alpha_0 \sin \varphi_0 + C_{YV}^D \cos \lambda - C_{ZV}^D \sin \lambda}. \quad (36)$$

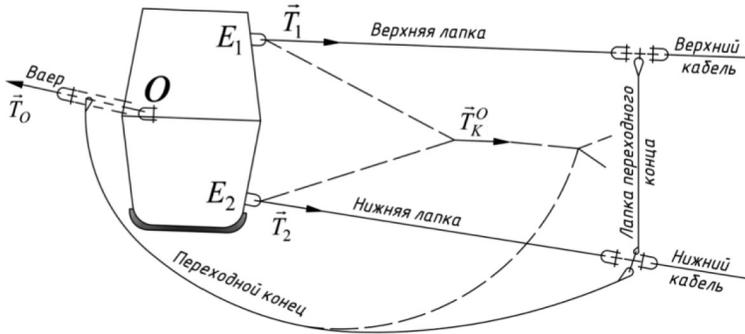


Рис. 5. Четырехугольная (сплошные линии) и треугольная (штриховые линии) схемы лапок доски; \tilde{T}_0 — натяжение ваера у доски; \tilde{T}_K^O — натяжение одинарного кабеля; E_1, E_2 — точки крепления лапок доски; O — точка крепления ваера

Fig. 5. Quadrangular (solid lines) and triangular (dashed lines) arrangements of backstops: \tilde{T}_0 — warp tension at the trawl board; \tilde{T}_K^O — single bridle tension; E_1, E_2 — points of the trawl board backstops attachment; O — point of the warp attachment

При четырехугольной схеме лапок доски (рис. 5):

$$\tilde{S} = \frac{\tilde{T}_1 \sin \nu_1 + \tilde{T}_2 \sin \nu_2 - tg \alpha_0 \sin \varphi_0}{\left| C_{XV}^D \right| tg \alpha_0 \sin \varphi_0 + C_{YV}^D \cos \lambda - C_{ZV}^D \sin \lambda}. \quad (37)$$

Здесь λ — угол крена доски ($\lambda > 0$ при крене доски на спину, $\lambda < 0$ при крене доски на дуги); ν — угол между одинарным кабелем и диаметральной плоскостью трала; θ — угол между плоскостью одинарных кабелей и горизонтом (угол между равнодействующей натяжений всех кабелей и горизонтом); $C_{XV}^D, C_{YV}^D, C_{ZV}^D$ — коэффициенты гидродинамических сил доски (рис. 6); α_0 — угол атаки ваера у траловой доски; φ_0 — угол крена плоскости потока ваера у доски; \tilde{T}_1, \tilde{T}_2 — натяжения верхнего и нижнего кабелей, отнесенные к половине сопротивления трала:

$$\tilde{T}_1 = T_1 / 0,5 R_X^T = \sin(\theta_2 - \theta) / \cos \theta \cos \nu_1 \sin(\theta_2 - \theta_1), \quad (38)$$

$$\tilde{T}_2 = T_2 / 0,5 R_X^T = \sin(\theta - \theta_1) / \cos \theta \cos \nu_2 \sin(\theta_2 - \theta_1). \quad (39)$$

Здесь приняты обозначения: $\theta_1 = \theta_K^B, \theta_2 = \theta_K^H, \nu_1 = \nu_K^B, \nu_2 = \nu_K^H$.

Суммарный вес в воде грузов (распределенных и сосредоточенных) и досок определяется из условий равновесия системы «трал-кабели-доски» (рис. 7):

$$Q_Z^{PT} + 2Q_Z^{CT} + 2Q_Z^D = \left(R_X^T + 2R_X^D \right) tg \theta_0 + \left| R_Z^T \right| \pm 2 \left| R_Z^D \right| - Q_Z^{CO} - Q_Z^K, \quad (40)$$

$$tg \theta_0 = tg \alpha_0 \cos \varphi_0. \quad (41)$$

Знак (+) — при крене доски на дуги; знак (–) — при крене доски на спину.

Если грузы и доски выполнены из одного материала (например, сталь), то их суммарная масса M_Σ :

$$M_\Sigma = M_{PT} + 2M_{CT} + 2M_D = \left(R_X^T + 2R_X^D \right) tg \theta_0 + \left| R_Z^T \right| \pm 2 \left| R_Z^D \right| - Q_Z^{CO} - Q_Z^K / (k_w g). \quad (42)$$

Откуда масса доски:

$$M_D = 0,5(M_\Sigma - M_{PT} - 2M_{CT}). \quad (43)$$

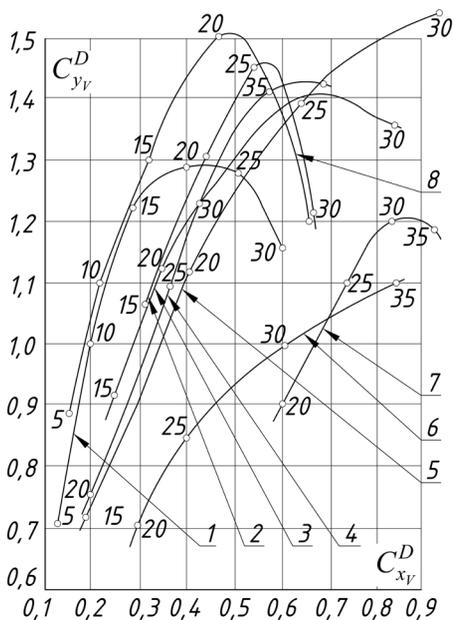


Рис. 6. Поляры траловых досок при их прямом обтекании потоком: 1 — прямоугольная цилиндрическая проекта 2490, $h/b = 2$; 2 — овальная цилиндрическая; 3 — композитная; 4 — многопластная норвежская; 5 — круглая сферическая; 6 — прямоугольная плоская; 7 — V-образная доска с плоскими щитками; 8 — V-образная со щитками в форме усеченных круговых конусов; 1, 2 — данные НПО промысловства за 1987 г.; 3–7 — по неопубликованным данным В.С. Воскресенского, 1993 г. и 8 — В.А. Кузика, 2002 г.

Fig. 6. Polars of trawl boards under direct flow around: 1 — rectangular-cylindrical trawl board, project 2490 ($h/b = 2$); 2 — oval-cylindrical trawl board; 3 — composite trawl board; 4 — Norwegian multi-panel trawl board; 5 — round-spherical trawl board; 6 — flat rectangular trawl board; 7 — V-shaped trawl board with flat panels; 8 — V-shaped trawl board with panels in the form of truncated circular cones; 1, 2 — data from Promrybolovstvo Co., 1987; 3–7 — unpublished data of V.S. Voskresensky, 1993; 8 — of V.A. Kuzik, 2002

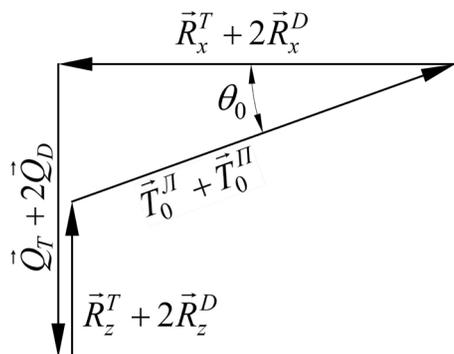


Рис. 7. Силовой многоугольник системы «трал–кабели–доски»: $\bar{T}_0^I, \bar{T}_0^{II}$ — натяжения ваеров у левой и правой траловых досок; \bar{Q}_T, \bar{Q}_D — вес в воде трала и доски

Fig. 7. Diagram of component forces in the system «trawl–bridles–boards»: $\bar{T}_0^I, \bar{T}_0^{II}$ — warps tension at the left and right trawl boards; \bar{Q}_T, \bar{Q}_D — weight of trawl and board in the water

Вертикальная гидродинамическая сила траловой доски R_z^D :

$$R_z^D = C_{zV}^D (0,5 \rho V^2) S, \quad C_{zV}^D = C_{yV}^D \sin \lambda + C_{xV}^D \cos \lambda, \quad (44)$$

где C_{zV}^D, C_{yV}^D — коэффициенты подъемной и поперечной сил траловой доски (см. рис. 6).

Если масса доски известна, то находят массу и вес в воде сосредоточенных грузов:

$$2M_{CT} = M_{\Sigma} - M_{PT} - 2M_D, \quad 2Q_z^{CT} = 2k_w^{CT} M_{CT} g, \quad (45)$$

а по формуле (20) определяют угол θ , необходимый для определения натяжения верхнего T_1 и нижнего T_2 кабелей по формулам (38) и (39). В этом случае формулы (33, 34) не используются.

Входящие в формулы (40–42) углы подхода ваера к траловой доске α_0 и φ_0 определяются численным решением на ЭВМ уравнений равновесия ваера.

Дифференциальные уравнения равновесия ваера в воде (участок OA , рис. 8):

$$\dot{T} = q_z \sin \alpha \cos \varphi - r_{xV} \cos \alpha + r_{zV} \sin \alpha; \quad (46)$$

$$\dot{\alpha} = (q_z \cos \alpha \cos \varphi + r_{xV} \sin \alpha_{xp} + r_{zV} \cos \alpha) / T; \quad (47)$$

$$\dot{\varphi} = -(q_z \sin \varphi + r_{yV}) / (T \sin \alpha); \quad (48)$$

$$\dot{x} = \cos \alpha; \quad \dot{y} = \sin \alpha \sin \varphi; \quad \dot{z} = -\sin \alpha \cos \varphi; \quad (49)$$

$$q_z = k_w mg; \quad k_w = 1 - m_w / m, \quad R_x^w = T \cos \alpha - T_0 \cos \alpha_0. \quad (50)$$

Дифференциальные уравнения равновесия ваера в воздухе (участок AB , рис. 8):

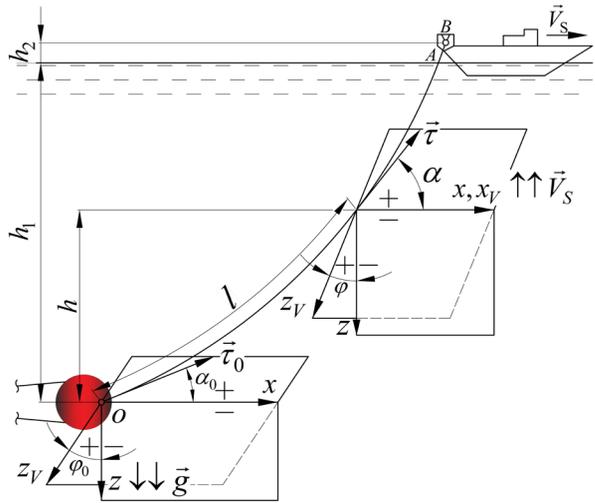
$$\dot{T} = G \sin \alpha \cos \varphi; \quad \dot{\alpha} = (G \cos \alpha \cos \varphi) / T; \quad \dot{\varphi} = -G \sin \varphi / (T \sin \alpha); \quad G = mg, \quad (51)$$

$$\dot{x} = \cos \alpha; \quad \dot{y} = \sin \alpha \sin \varphi; \quad \dot{z} = -\sin \alpha \cos \varphi.$$

Здесь T_0, α_0, T, α — натяжение ваера и его угол атаки в начальной и текущей точках; q_z — проекция на ось $z \downarrow \vec{g}$ веса в воде 1 м ваера; g — ускорение свободного падения; m_w, m — масса воды, вытесненной 1 м ваера, и его линейная плотность; φ_0, φ — угол крена плоскости потока ваера у доски и в текущей точке (рис. 8).

Рис. 8. Характеристики ваера:
 O — точка крепления ваера к доске;
 A — точка выхода ваера из воды; B — ваерный блок

Fig. 8. Warp characteristics:
 O — point of warp attachment to trawl board;
 A — point of warp emergence; B — warp block



Системы (46–51) записаны в нормальной форме Коши, наиболее удобной для их численного решения на ЭВМ. Для этих систем решается краевая задача со следующими граничными условиями:

$$x(0) = y(0) = z(0) = 0; y_B = y(l_B) = -(B_D - e)/2; z_B = z(l_B) = -(h_1 + h_2), \quad (52)$$

где B_D, e — расстояния между траловыми досками и ваерными блоками; h_1, h_2 — расстояния от доски и ваерных блоков до поверхности воды; l_B — дуговая координата ваерного блока (длина вытравленного ваера) (рис. 8).

Разработана программа СМ-ТW, позволяющая на ПК рассчитывать характеристики ваеров для буксировки тралов на любых глубинах*. Для расчета характеристик ваера по программе СМ-Warp необходимо знать:

- угол атаки ваера у доски α_0 ;
- натяжение ваера у доски T_0 ;
- расстояние между траловыми досками B_D .

Углом атаки ваера у доски задаются $\alpha_0 \in (10 \div 50^\circ)$. Причем $\alpha_0 = 20 - 50^\circ$ — при тралении на глубинах менее 20 м; $\alpha_0 = 10 - 20^\circ$ — при тралении на глубинах более 20 м.

С ростом угла α_0 уменьшается длина ваера, но растет его сопротивление, поэтому рекомендуется выбирать небольшие значения этого угла.

Натяжение ваера у доски определяется по формуле

$$T_0 = |R_X^T + R_X^K + 2R_X^D| / 2 \cos \alpha_0. \quad (53)$$

Здесь R_X^T, R_X^K, R_X^D — гидродинамические сопротивления трала, кабелей и доски:

$$R_X^D = C_X^D (0,5 \rho V^2) S, \quad (54)$$

где C_X^D — коэффициент гидродинамического сопротивления доски ($C_X^D = C_{XV}^D$, см. рис. 6); S — затененная площадь доски (площадь доски в плане).

Расстояние между досками B_D определяется по формуле

$$B_D = B_y + 2(l_{KP} + l_{ГК} + l_1 + l_{Л}) \sin \nu_K^B, \quad (55)$$

где $l_{KP}, l_{ГК}$ — длина крыла трала и самого конца подборы; $l_{Л}$ — длина лапок доски.

Изложенная выше методика расчета параметров оснастки трала проверена на промысле ТИНРО-центром при оснащении тралов для лова скумбрии, сардины и минтая.

* Габрюк В.И., Габрюк А.В. Компьютерное моделирование канатов для буксировки орудий рыболовства (СМ-ТW). Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2001611049 от 20 августа 2001 г.

Заклучение

Представленная математическая модель оснастки разноглубинных тралов является универсальной, так как позволяет выполнять моделирование без каких-либо ограничений на натяжение кабелей при использовании как треугольной, так и четырехугольной схем крепления лапок к траловой доске.

На этапе проектирования тралов, используя изложенную в данной работе математическую модель и компьютерную технику, легко рассчитывать основные характеристики гидродинамических щитков, распределенных и сосредоточенных грузов, а также параметры траловых досок, обеспечивающих заданные горизонтальное и вертикальное раскрытия входного устья разноглубинных тралов и заданный горизонт движения трала.

Отличительной особенностью предлагаемой методики математического моделирования оснастки разноглубинных тралов является системный подход: трал, траловые доски, ваеры рассматриваются как единый траловый комплекс.

Список литературы

Баранов Ф.И. Техника промышленного рыболовства : моногр. — М. : Пищепромиздат, 1960. — 696 с.

Бойцов А.Н., Астафьев С.Э. Оснастка входного устья разноглубинного трала // Поведение рыб и орудия лова. — Владивосток : ТИНРО, 1983. — С. 27–32.

Габрюк В.И. Механика орудий рыболовства в математических моделях, алгоритмах, компьютерных программах : моногр. — Владивосток : Дальрыбвтуз, 2011. — 517 с.

Габрюк В.И. Проектирование и моделирование орудий океанического рыболовства : моногр. — Владивосток : Дальрыбвтуз, 2016. — 399 с.

Габрюк В.И., Чернецов В.В., Бойцов А.Н. Основы моделирования рыболовных систем : моногр. — Владивосток : Дальрыбвтуз, 2008. — 559 с.

Жуков В.П., Лунин В.И. О коэффициентах сопротивления пелагических тралов // Рыб. хоз-во. — 1976. — № 6. — С. 56–57.

Осипов Е.В., Бойцов А.Н., Кудакеев В.В. Методика проектирования гибкого распорного устройства для горизонтального раскрытия тралов // Науч. тр. Дальрыбвтуза. — 2011. — Т. 23. — С. 64–68.

Шевченко А.И., Бойцов А.Н. Обоснование параметров устья разноглубинных тралов // Поведение рыб и орудия лова. — Владивосток : ТИНРО, 1983. — С. 12–16.

References

Baranov, F.I., *Tekhnika promyshlennogo rybolovstva* (Industrial Fishing Techniques), Moscow: Pishchepromizdat, 1960.

Boitsov, A.N. and Astaf'ev, S.E., Equipment of the midwater trawl mouth, in *Povedenie ryb i orudiya lova* (Behavior of Fish and Fishing Gears), Vladivostok: TINRO, 1983, pp. 27–32.

Gabryuk, V.I., *Mekhanika orudii rybolovstva v matematicheskikh modelyakh, algoritmakh, komp'yuternykh programmakh* (Mechanics of Fishing Gear in Mathematical Models, Algorithms, and Computer Programs), Vladivostok: Dal'rybvтуz, 2011.

Gabryuk, V.I., *Proektirovanie i modelirovanie orudii okeanicheskogo rybolovstva* (Design and Simulation of Ocean Fishing Gear), Vladivostok: Dal'rybvтуz, 2016.

Gabryuk, V.I., Chernetsov, V.V., and Boitsov, A.N., *Osnovy modelirovaniya rybolovnykh sistem* (Basics of Simulation of Fishing Systems), Vladivostok: Dal'rybvтуz, 2008.

Zhukov, V.P. and Lunin, V.I., On the drag coefficients of pelagic trawls, *Rybn. Khoz.*, 1976, no. 6, pp. 56–57.

Osipov, E.V., Boicov, A.N., and Kudakaev, V.V., Technique of designing flexible otter devices for horizontal disclosing of trawls, *Nauchn. Tr. Dal'rybvтуza*, 2011, vol. 23, pp. 64–68.

Shevchenko, A.I. and Boitsov, A.N., Substantiation of the mouth of the midwater trawls, in *Povedenie ryb i orudiya lova* (Behavior of Fish and Fishing Gears), Vladivostok: TINRO, 1983, pp. 12–16.

Gabryuk, V.I. and Gabryuk, A.V., Computer simulation of ropes for towing fishing gear (CM-TW), *Svidetel'stvo ob ofitsial'noi registratsii programmy dlya EVM N 2001611049* (Certificate of Official Registration of the Computer Program no. 2001611049), August 20, 2001.

Поступила в редакцию 5.09.2018 г.

После доработки 21.09.2018 г.

Принята к публикации 11.10.2018 г.