Научные труды Дальрыбвтуза. 2024. Т. 67, № 1. С. 75–88. Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University. 2024. Vol. 67, no 1. P. 75–88.

РЫБНОЕ ХОЗЯЙСТВО, АКВАКУЛЬТУРА И ПРОМЫШЛЕННОЕ РЫБОЛОВСТВО

Научная статья УДК 639.2.081.1 DOI: https://doi.org/10.48612/dalrybvtuz/2024-67-07

Методика моделирования симметричных и несимметричных траловых систем

Виктор Иванович Габрюк¹, Василий Владимирович Кудакаев², Евгений Евгеньевич Мазур³

^{1,3} ООО «Приморский канат», Большой Камень, Россия

² Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, Владивосток, Россия

¹gabrukvi@rambler.ru ²kudakaev_v@mail.ru ³mazuree@mail.ru

Аннотация. Одной из ключевых задач моделирования симметричных и несимметричных рыболовных траловых систем является аналитический расчет координат точек подключения ваеров и лапок кабелей к доскам. Эти точки следует выбирать таким образом, чтобы при тралении сохранялось устойчивое равновесие как траловых досок, так и всей траловой системы во время процесса траления. Рассмотрена методика решения этой задачи с использованием математических моделей, разработанных профессором В.И. Габрюком [2]. Изложенные в статье расчётные данные хорошо согласуются с экспериментальными данными Севастопольской базы подводных исследований, это подтверждает корректность разработанных математических моделей и предлагаемой методики.

Ключевые слова: методика, математическое моделирование, траловые доски, несимметричные траловые системы, математические модели

Для цитирования: Габрюк В.И., Кудакаев В.В., Мазур Е.Е. Методика моделирования симметричных и несимметричных траловых систем // Научные труды Дальрыбвтуза. 2024. Т. 67, № 1. С. 75–88.

FISHERIES, AQUACULTURE AND INDUSTRIAL FISHERIES

Original article

DOI: https://doi.org/10.48612/dalrybvtuz/2024-67-07

© Габрюк В.И., Кудакаев В.В., Мазур Е.Е., 2024

Modeling technique for symmetrical and asymmetrical trawl systems

Viktor I. Gabruk¹, Vasilii V. Kudakaev², Evgenii E. Mazur³

^{1,3} Primorsky Rope LLC, Bolshoy Kamen, Russia

² Far Eastern State Technical Fisheries University, Vladivostok, Russia

¹gabrukvi@rambler.ru

²kudakaev_v@mail.ru

³mazuree@mail.ru

Abstract. One of the key objectives of modeling symmetric and asymmetric fishing trawl systems is the analytical determination of the connection points coordinates for the warps and backstrops to the trawl doors. These points should be selected so that, during trawling, there is a stable equilibrium both of the trawl doors and the entire trawl system during the trawling process. The paper presents a methodology that allows solving the above problem using mathematical models developed by Professor Viktor.I. Gabryuk [2]. The computational data presented in the paper closely match the experimental data of the Sevastopol Base for Underwater Research, which confirms the correctness of the developed mathematical models and the proposed methodology.

Keywords: methodology, mathematical modeling, trawl doors, asymmetric trawl systems, mathematical models

For citation: Gabruk V.I., Kudakaev V.V., Mazur E.E. Modeling technique for symmetrical and asymmetrical trawl systems. *Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University*. 2024; 67(1):75–88. (in Russ.).

Введение

Множество работ различных авторов посвящены механике траловых досок [1–10]. Это обусловлено тем, что точность настройки траловых досок определяет горизонт траления, раскрытие, устойчивое движение и уловистость тралов. Настройка траловых досок осуществляется путем вариации положения точек крепления ваеров и лапок. Выбор местоположения этих точек, т.е. настройка траловой доски, обычно осуществляется экспериментально в условиях промысла. Однако определять положение этих точек можно и аналитически. Эта статья представляет методику настройки траловой системы с ваерами одинаковой и разных свивок по левому и правому борту судна путём математического моделирования.

Объекты и методы исследований

На промысле используют симметричные и несимметричные траловые системы, рис. 1. Система будет симметричной, когда для ваеров по левому борту используется стальной канат левой свивки, а по правому – правой; несимметричной, когда по обоим бортам судна используют стальные канаты одноимённой свивки, как правило, правой.

Для математического моделирования траловой системы досками связывают декартовы системы координат: земную (ЗСК) $x_g y_g z_g$, досковую (ДСК) $x_D y_D z_D$, поточную (ПСК) $x_V y_V z_V$. С правой доской – правые, с левой – левые системы, рис. 1.



Рис. 1. Траловая рыболовная система: 1 – траловая доска; 2 – кабели; 3 – трал; 4 – судно. ДП – диаметральная плоскость траловой системы; A – точка пересечения ваера с поверхностью воды; B – блок ваерный; E_1, E_2 – точки подключения лапок верхних и нижних к доскам; O – точка подключения ваера к доске; B_D – расстояния между досками; e – расстояния между ваерными блоками

Fig. 1. Trawl fishing system: 1 - trawl board; 2 - cables; 3 - trawl; 4 - vessel. DP - the diametrical plane of the trawl system; $A - \text{the point of intersection of the waer with the surface of the water; <math>B - \text{the waer block}$; $E_1, E_2 - \text{the points of connection of the upper and lower legs to the boards}; O - \text{the point of connection of the waer to the board}$; $B_D - \text{the distances between the boards}$; e - the distances between the boards; e

Для симметричных траловых систем параметры левых и правых траловых досок одинаковы, поэтому достаточно определить параметры одной из досок, как правило, правой. В случае несимметричных траловых систем углы атаки левой и правой досок α_D и их углы крена λ_D разные, т.е. $\alpha_D^n \neq \alpha_D^n$, $\lambda_D^n \neq \lambda_D^n$. Причём, если используются ваеры правой свивки по обоим бортам, то угол атаки левой доски будет больше угла атаки правой доски, т.е. $\alpha_D^n > \alpha_D^n$. Различия также присутствуют и в параметрах ваеров у досок: натяжениях $T_0^n \neq T_0^n$, углах атаки $\alpha_0^n \neq \alpha_0^n$ и углах крена плоскостей потока $\varphi_0^n \neq \varphi_0^n$. Параметры ваеров у доски определяются путём решения краевых задач для дифференциальных уравнений их равновесия (1):

$$\dot{T} = -r_{X_V} \cos \alpha + r_{Z_V} \sin \alpha + q_Z \sin \alpha \cos \varphi;$$

$$\dot{\alpha} = \frac{r_{X_{V}}\sin\alpha_{xp} + r_{Z_{V}}\cos\alpha + q_{Z}\cos\alpha\cos\varphi}{T};$$

$$\dot{\varphi} = -\frac{r_{Y_V} + q_Z \sin \varphi}{T \sin \alpha};$$

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

$$r_{X_{V}} = C_{X_{V}} \frac{\rho V^{2}}{2} d, \ C_{X_{V}} = -(c_{11} \sin^{2} \alpha + c_{12} \sin^{4} \alpha + c_{13} \cos^{2} \alpha), \ \alpha \in (-\infty, \infty);$$

$$r_{Y_{V}} = C_{Y_{V}} \frac{\rho V^{2}}{2} d, \ C_{Y_{V}} = \pm (c_{21} \sin \alpha \cos \alpha + c_{22} \sin^{3} \alpha \cos \alpha), \quad \alpha \in (-\infty, \infty);$$

$$r_{Z_{\nu}} = C_{Z_{\nu}} \frac{\rho V^2}{2} d, \quad C_{Z_{\nu}} = -(c_{31} \sin \alpha \cos \alpha + c_{32} \sin^3 \alpha \cos \alpha), \quad \alpha \in (-\infty, \infty),$$

где q_Z – проекция веса ваера длиной 1 м в воде на ось z; T – натяжение; α – угол атаки ваера в текущей точке; φ – угол крена плоскости потока ваера; $C_{X_V}, C_{Y_V}, C_{Z_V}$ – коэффициенты гидродинамических сил канатов в поточной системе координат (ПСК). Точкой в (1) обозначено дифференцирование по дуговой координате *l*.

Первой решают краевую задачу для ваера левого борта при следующих граничных условиях в **левой** декартовой системе координат.

$$x_{0}^{n} = y_{0}^{n} = z_{0}^{n} = 0; \ \alpha_{0}^{n} = 15 - 40^{\circ}; \ y_{B}^{n} = \frac{e - B}{2}; \ z_{B}^{n} = h_{1} + h_{2};$$

$$T_{0}^{n} = \frac{R_{X}^{T}/2 + R_{X}^{nD}}{\cos \alpha_{0}^{n}}; \ R_{X}^{nD} = C_{X_{V}}^{nD} \frac{\rho V^{2}}{2}S;$$

$$r_{Y_{V}}^{n} = -C_{Y_{V}} \frac{\rho V^{2}}{2} d = -(c_{21} \sin \alpha^{n} \cos \alpha^{n} + c_{22} \sin^{3} \alpha^{n} \cos \alpha^{n}) \frac{\rho V^{2}}{2} d.$$

Затем решается краевая задача для ваера правого борта со следующими граничными условиями в **правой** декартовой системе координат:

$$\begin{aligned} x_0^n &= y_0^n = z_0^n = 0 \; ; \; \alpha_0^n = 15 - 30^o \; ; \; x_B^n = x_B^n \; ; \; y_B^n = y_B^n \; ; \; z_B^n = z_B^n \; ; \\ T_0^n &= (0.5R_X^T + R_X^{nD}) / \cos \alpha_0^n \; , \; \alpha_D^n < \alpha_D^n \; ; \; R_X^{nD} = 0.5C_{X_V}^{nD} \rho V^2 S \; ; \\ r_{Y_V}^n &= 0.5C_{Y_V}^2 \rho V^2 d = 0.5(c_{21}\sin\alpha^n\cos\alpha^n + c_{22}\sin^3\alpha^n\cos\alpha^n) \rho V^2 d \; . \end{aligned}$$

Здесь α_D^n, α_D^n – углы атаки левой и правой досок; α_0^n, α_0^n – углы атаки ваера у левой и правой досок; x_B^n, y_B^n, z_B^n – координаты ваерного блока в левой системе координат; B_D – расстояние между точками подключения ваеров к левой и правой траловым доскам; e – расстояние между ваерными блоками обоих бортов; $r_{Y_V}^n$ – боковая сила каната в левой системе координат; $R_X^n, R_X^{nD}, R_X^{nD}$ – сопротивление трала, правой и левой траловых досок.

Системы координат и силы, приложенные к доске, приведены на рис. 2.

Для обеспечения устойчивости работы траловых досок решают следующие задачи: находят площадь доски в плане S; вес в воде Q; массу M_D ; координаты точек подключения верхней E_1 , нижней E_2 лапок и ваера к доске O.

При решении данных задач учитывают следующее: условия равновесия досок, условия устойчивости равновесия, геометрию доски и конструктивные особенности.



Рис. 2. Используемые для расчётов системы координат и силы Fig. 2. Coordinate systems and forces used for calculations

Из условий равновесия траловых досок в ЗСК $(x_g y_g z_g)$, рис. 1, получены формулы для определения площади траловой доски в плане S(2), её веса в воде Q(3) и массы M(4)[2]:

$$S = \widetilde{S}R_X^T / \rho V^2, \ \widetilde{S} = \frac{tg\alpha_N^o - tg\alpha_0 \sin\varphi_0}{\left|C_{X_V}^D\right| tg\alpha_0 \sin\varphi_0 + C_{Y_V}^D \cos\lambda - C_{Z_V}^D \sin\lambda};$$
(2)

$$Q = 0.5\widetilde{Q}R_X^T, \ \widetilde{Q} = (1 + \left|C_{X_V}^D\right|\widetilde{S})tg\alpha_0\cos\varphi_0 - \widetilde{S}(C_{Y_V}^D\sin\lambda + C_{Z_V}^D\cos\lambda) - tg\theta;$$
(3)

$$M = Q/k_W g , (4)$$

где R_X^T – сила сопротивления воды, действующая на трал; α_N^{δ} – угол атаки сетного полотна в районе устья трала; α_0, φ_0 – углы подхода ваера к доске; $C_{X_V}^D, C_{Y_V}^D, C_{Z_V}^D$ – коэффициенты гидродинамические для доски; λ – угол крена траловой доски; θ – угол между горизонтом и равнодействующей натяжений всех кабелей трала; k_W – коэффициент веса в воде (для стали k_W =0,87).

Координаты точки O подключения ваера к доске x_0, y_0, z_0 определяются по формулам (5), полученным из моментных уравнений равновесия траловой доски, рис. 2:

$$\Sigma M_{z}(\vec{F}_{K}) = 0 \Longrightarrow a_{2}x_{0} - a_{1}y_{0} = b_{1},$$

$$\Sigma M_{y}(\vec{F}_{K}) = 0 \Longrightarrow a_{3}x_{0} - a_{1}z_{0} = b_{2},$$

$$\Sigma M_{x}(\vec{F}_{K}) = 0 \Longrightarrow a_{3}y_{0} - a_{2}z_{0} = b_{3},$$
(5)

где
$$a_1 = R_1 + Q_1 + T_{11} + T_{21}, a_2 = R_2 + Q_2 + T_{12} + T_{22}, a_3 = R_3 + Q_3 + T_{13} + T_{23},$$

 $b_1 = R_2 x_D - R_1 y_D + Q_2 x_C - Q_1 y_C + T_{12} x_1 - T_{11} y_1 + T_{22} x_2 - T_{21} y_2,$
 $b_2 = R_3 x_D - R_1 z_D + Q_3 x_C - Q_1 z_C + T_{13} x_1 - T_{11} z_1 + T_{23} x_2 - T_{21} z_2,$
 $b_3 = R_3 y_D - R_2 z_D + Q_3 y_C - Q_2 z_C T_{13} y_1 - T_{12} z_1 + T_{23} y_2 - T_{22} z_2.$

Проекции сил, действующих на доску, на оси ДСК:

$$Q_{1} = Q \sin \alpha_{D} \sin \lambda_{D}, \ Q_{2} = Q \cos \alpha_{D} \sin \lambda_{D}, \ Q_{3} = Q \cos \lambda_{D},$$

$$R_{1} = R_{X_{V}} \cos \alpha_{D} + R_{Y_{V}} \sin \alpha_{D} = (-|C_{X_{V}}| \cos \alpha_{D} + C_{Y_{V}} \sin \alpha_{D}) \frac{\rho V^{2}}{2} S,$$

$$R_{2} = -R_{X_{V}} \sin \alpha_{D} + R_{Y_{V}} \cos \alpha_{D} = (|C_{X_{V}}| C_{X_{V}} \sin \alpha_{D} + C_{Y_{V}} \cos \alpha_{D}) \frac{\rho V^{2}}{2} S,$$

$$R_{3} = R_{Z_{V}},$$

$$T_{11} = T_{1} \sin \alpha_{D} \cos v_{1} (\sin \lambda_{D} \sin \theta_{1} - ctg \alpha_{D} \cos \theta_{1} - \cos \lambda_{D} tg v_{1}),$$

$$T_{12} = T_{1} \cos \alpha_{D} \cos v_{1} (\sin \lambda \sin \theta_{1} + tg \alpha_{D} \cos \theta_{1} - \cos \lambda_{D} tg v_{1}),$$

$$T_{13} = T_{1} \cos \lambda_{D} \cos v_{1} (tg \lambda tg v_{1} + \sin \theta_{1}),$$

$$T_{21} = T_{2} \sin \alpha_{D} \cos v_{2} (\sin \lambda \sin \theta_{2} - ctg \alpha_{D} \cos \theta_{2} - \cos \lambda_{D} tg v_{2}),$$

$$T_{22} = T_{2} \cos \alpha_{D} \cos v_{2} (\sin \lambda \sin \theta_{2} + tg \alpha_{D} \cos \theta_{2} - \cos \lambda_{D} tg v_{2}),$$

$$T_{23} = T_{2} \cos \lambda_{D} \cos v_{2} (tg \lambda_{D} tg v_{2} + \sin \theta_{2}),$$

где $R_{X_{v}}$, $R_{Y_{v}}$, $R_{Z_{v}}$ – проекции гидродинамической силы на оси ПСК доски; α_{D} , λ_{D} – углы атаки и крена траловой доски; v_{1} – угол между верхним, v_{2} – угол между нижним кабелями и ДП трала; θ – угол между плоскостями одинарных, θ_{1} – верхних / θ_{2} нижних кабелей и горизонтом; T_{1} – натяжения верхнего и T_{2} нижнего кабелей, определяются как

$$T_1 = \frac{R_X^T \sin(\theta_2 - \theta)}{2\cos\theta\cos\nu_1\sin(\theta_2 - \theta_1)}, \ T_2 = \frac{R_X^T \sin(\theta - \theta_1)}{2\cos\theta\cos\nu_2\sin(\theta_2 - \theta_1)}$$

Из условия совместности (непротиворечивости) моментных уравнений равновесия доски (5), вытекающего из теоремы Кронекера–Капелли, получена формула (7) для определения координат точек подключения верхней $E_1(x_1, y_1, z_1)$ и нижней $E_2(x_2, y_2, z_2)$ лапок к доске:

$$x_{1}(a_{2}T_{13} - a_{3}T_{12}) + y_{1}(a_{3}T_{11} - a_{1}T_{13}) + z_{1}(a_{1}T_{12} - a_{2}T_{11}) + x_{2}(a_{2}T_{23} - a_{3}T_{22}) + y_{2}(a_{3}T_{21} - a_{1}T_{23}) + z_{2}(a_{1}T_{22} - a_{2}T_{21}) + C = 0,$$
(7)

где $C = a_1(z_DR_2 - y_CQ_3 - y_DR_3 + z_CQ_2) + a_2(x_DR_3 - z_DR_1 + x_CQ_3 - z_CQ_1) + a_3(y_DR_1 - x_DR_2 + y_CQ_1 - x_CQ_2).$

Для обеспечения устойчивости и плавного обтекания траловых досок должны выполняться условия:

- $\alpha < \alpha_{\kappa p}$ – угол атаки доски должен быть ниже критического;

- $\beta = 0$ – угол скольжения потока должен быть равен нулю, т.е. поток воды будет параллелен стрингерам доски и не создаст дополнительного сопротивления.

Условия плавного обтекания траловых досок $\alpha < \alpha_{\kappa p}$; $\beta = 0$ являются необходимыми, но не достаточными условиями устойчивого равновесия досок. В положении равновесия доски главные моменты действующих на доску сил, равны нулю, т.е. $M_{\chi} = M_{\chi} = 0$.

Случайные воздействия могут вывести доску из положения равновесия, при этом углы атаки α и крена λ получают приращения $\Delta \alpha$ и $\Delta \lambda$ и возникают отличные от нуля главные моменты $\Delta M_x \neq 0$, $\Delta M_z \neq 0$.

Равновесие доски будет устойчивым, если при малых ее отклонениях от положения равновесия возникают моменты ΔM_X и ΔM_Z , стремящиеся вернуть ее в положение равновесия. Это возможно тогда, когда знаки моментов ΔM_X , ΔM_Z и приращений углов $\Delta \alpha$ и $\Delta \lambda$ противоположны, что аналитически выражается неравенствами

$$M_{X}^{\lambda} = \partial M_{X} / \partial \lambda < 0, M_{Z}^{\alpha} = \partial M_{Z} / \partial \alpha < 0.$$
(8)

Здесь верхние индексы λ , α обозначают производные по соответствующим углам.

Первое неравенство – аналитическое условие поперечной устойчивости траловой доски (устойчивости по крену), второе – продольной устойчивости (устойчивости по углу атаки).

Результаты и их обсуждение

Методику моделирования траловых систем рассмотрим на следующем примере. Необходимо выбрать траловую доску из проекта 2490 [2] с параметрами:

S – площадь доски в плане, M^2	4	4.5	5	6	7	8	9
М – масса доски, кг	850	890	930	1350	1410	1810	2040

для горизонтального раскрытия устья трала 118/620 метров, разработанную В.А. Кузиком (НБАМР), и определить координаты точек подключения ваеров и лапок к доскам левого и правого бортов при следующих начальных условиях:

- скорость траления V = 4,5 уз;

- глубина траления $h_1 = 130$ м;

- агрегатное сопротивление трала $R_X^T = 147$ кH;

- угол атаки боковой пласти мотни трала $\alpha_N^{\delta} = 8,3^{\circ};$

- размеры устья трала: горизонтальный $B_v = 60$ м и вертикальный $H_v = 50$ м;

- длины: крыла $l_{KP} = 52$ м, голого конца подборы $l_{TK} = 50$ м, кабелей $l_K = 70$ м, регулировочной цепи нижнего кабеля $l_{PII} = 3$ м;

- ваер – стальной канат с металлическим сердечником по ГОСТ 7669-80: диаметр d = 28 мм, линейная плотность m = 3,4 кг/м.

Самой ответственной операцией является выбор угла между плоскостью кабелей и горизонта θ . Угол θ зависит от вертикального раскрытия устья трала H_y и разности горизонтов хода гужа верхней подборы и доски $h_3 = h_{u_1} - h_1$. Для обеспечения устойчивой работы траловой системы необходимо выполнение условия $h_3 = -(5 \div 10)$ м. Выберем $h_3 = -5$ м. Угол θ изменяется в пределах $\theta \in (\theta_1 \div \theta_2)$.

Угол θ_1 определяется как

$$\sin \theta_1 = h_3 / (l_{KP} + l_{TK} + l_1) = -5 / (52 + 50 + 70) = -0.029 \Longrightarrow \theta_1 = -1.66^\circ.$$

Проекция нижнего кабеля на вертикаль: $h_4 = H_y + h_3 = 50 - 5 = 45$ м.

Угол θ_2 определяется как

$$\sin \theta_2 = h_4 / (l_{TK} + l_2) = 45 / (50 + 73) = 0,366 \Longrightarrow \theta_2 = 20,5^\circ,$$

где $l_2 = l_1 + l_{PU} = 70 + 3 = 73 \ \text{м}$ – длина нижнего кабеля.

Таким образом, угол θ изменяется в пределах $\theta \in (-1,66^\circ \div 20,5^\circ)$. Угол θ зависит от массы оснастки нижней подборы распределёнными (якорные цепи) и сосредоточенными (грузы углубители) грузами.

Для выбора угла θ зададим условие, что натяжения кабелей будет примерно одинаково $T_1 \approx T_2$, тогда

$$\theta \approx (\theta_1 + \theta_2)/2 = (-1,42 + 20,5)/2 = 9,54^{\circ}$$

При определении площади доски в плане и её веса в воде угол атаки ваера у доски задают в пределах $\alpha_0 = 15-30^\circ$, а угол крена φ_0 рассчитывают в программе CM-Warp [2].

Доски проекта 2490 были лишены запаса устойчивости к крену из-за того, что у них $\tilde{M}_{X}^{\lambda} \approx 0$, и поэтому на промысле они совершали колебания по крену (Норинов, 1996).

Ведущий инженер НБАМР В.А. Кузик предложил для увеличения поперечной устойчивости равновесия досок проекта 2490 подключать лапки не к щитку доски, как в проекте Аугулиса, а на планке, которая проходит по всей высоте доски и находится на расстоянии 0,1 м от щитка доски (рис. 3). Это позволило увеличить ординату точки крепления лапки с проектного $y_1 = y_2 = y_E = 0,033$ м, когда лапки подключались непосредственно к щитку доски, до $y_1 = y_2 = y_E = 0,133$ м и повысить поперечную устойчивость движения доски. Расчёты, описанные ниже, выполнены для траловой доски проекта 2490, модернизированной В.А. Кузиком.



Рис. 3. Прямоугольная цилиндрическая траловая доска проекта 2490 с продольной планкой для крепления лапок
 Fig. 3. Rectangular cylindrical trawl board of project 2490 with a longitudinal bar for fastening the legs

Используя программу СМ-Warp, определяются параметры ваера:

$$\alpha_0 = 20^\circ$$
; $\varphi_0 = -27, 4^\circ$; $T_0 = 87,5$ кН; $l_W = 427$ м; $R_X^W = 1,41$ кН; $x_B = 366$ м,

где l_w , R_X^W – длина и сопротивление ваера; x_B – абсцисса ваерного блока, см. рис. 1.

Из уравнения (2) можно определить площадь доски в плане $S = 8,1 \, M^2$, из (3) – вес траловой доски в воде Q = 15355 H, из (4) – массу M = 1801 кг.

Из параметрического ряда выбирается траловая доска проекта 2490 площадью в плане $S = 8 \ m^2$ и массой M = 1810 кг, параметры которой практически совпадают с расчётными.

Для несимметричной траловой системы с ваерами правой свивки по обоим бортам определим координаты точек подключения лапок и ваеров к выбранной выше доске $S = 8 \text{ м}^2$ (b = 2 м - хорда, h = 4 м - высота). Далее расчеты выполняются для раздельной схемы лапок, как чаще используемой на промысле.

При моделировании несимметричных траловых систем необходимо выполнить главное условие: диаметральные плоскости трала и судна должны совпадать. Откуда вытекают следующие параметры левой и правой траловых досок.

Параметры доски левого борта: $\alpha_D^n = 20^\circ$; $C_{X_V}^D = 0,4$; $C_{Y_V}^D = 1,28$; $C_{Z_V}^D = 0$; $C_{X_V}^\alpha = 1,2$; $C_{Y_V}^\alpha = 1,0$; $x_D^\alpha = 0,4$ м; $x_C = 0,07$ м; $y_C = 0,08$ м; $z_C = 0,59$ м; $x_D(20^\circ) = 0,12b = 0,24$ м; $y_D = z_D = 0$;

 $x_E = -0.47b = -0.94 \text{ }$ *M*; $y_E = 0.133 \text{ }$ *M*,

где C_{XV}^{α} ; C_{YV}^{α} – производные от коэффициентов гидродинамических сил доски по углу атаки α_D . Параметры доски правого борта: $\alpha_D^n = 15^\circ$; $C_{X_V}^D = 0,28$; $C_{Y_V}^D = 1,22$; $C_{Z_V}^D = 0$; $C_{X_V}^{\alpha} = 1,1$; $C_{Y_V}^{\alpha}$

=2,27; x_D^{α} =0,8 m; x_C =0,07 m; y_C =0,08 m; z_C =0,59 m; $x_D(15^{\circ})$ =0,1 b=0,2 m; y_D = z_D =0;

$$x_E = -0.47b = -0.94 \text{ }$$
M; $y_E = 0.133 \text{ }$ *M*.

Значения гидродинамических коэффициентов и производных от них взяты из графиков гидродинамических коэффициентов доски [2].

Используя формулы (2–8) и координаты точки крепления дуги *A*: $x_A = 0,5$ м; $y_A = 0$ (рис. 4); при длине дуги L = 0,7 м, найдены параметры досок:

$$\lambda_D^n = 7^\circ; \ \delta_D^n = -62^\circ; \ M_Z^\alpha = -148 \text{ KHm}; \ M_X^\lambda = -10,8 \text{ KHm}; x_0^n = 0,73; \ y_0^n = -0,45; \ z_0^n = 0,01 \text{ m}; x_1^n = -0,94; \ y_1^n = -0,133; \ z_1^n = -1,2 \text{ m}; x_2^n = -0,94; \ y_2^n = -0,133; \ z_2^n = 1,8 \text{ m}; - правой:
$$\lambda_D^n = 5,5^\circ; \ \delta_D^n = -43,4^\circ; \ M_Z^\alpha = -158 \text{ KHm}; \ M_X^\lambda = -12,4 \text{ KHm}; x_0^n = 0,86; \ y_0^n = -0,35; \ z_0^n = 0,02 \text{ m}; x_1^n = -0,94; \ y_1^n = -0,133; \ z_1^n = -1,2 \text{ m}; x_2^n = -0,94; \ y_2^n = -0,133; \ z_2^n = 1,8 \text{ m};$$$$

где M_Z^{α} , M_X^{λ} – производные от моментов по углу атаки и крена; δ – угол между плоскостью дуги и плоскостью доски ($x_D \ z_D$), см. рис. 3.



Рис. 4. Траловые доски (левая а и правая б) площадью в плане $S = 8 M^2$;

B - аппликаты точек подключения верхней и нижней лапокFig. 4. Trawl boards (left a and right 6) with an area in the plan;<math>B - applications of the connection points of the upper and lower legs

Отрицательные значения производных от главных моментов указывают на то, что доски работают устойчиво. Расчёты показали, что верхнюю лапку надо крепить в первое отверстие сверху доски, нижнюю – в пятое отверстие снизу доски, а ваер крепить в среднее отверстие планки для подключения ваера, рис. 4. За счёт выбора длин цепей необходимо обеспечить углы между дугой и плоскостью доски: для левой доски $\delta = -62^\circ$, а для правой – $\delta = -43,4^\circ$.

При моделировании также использовались геометрические соотношения:

$$x_{0} = x_{A} + L\cos\delta + L_{0}\cos\delta_{0}; \ y_{0} = y_{A} + L\sin\delta + L_{0}\sin\delta_{0};$$

$$\cos\delta_{0} = (AB + L\cos\delta)/L_{1}; \ \sin\delta_{0} = L\sin\delta/L_{1}; \ \delta,\delta_{0} \in (-0,5\pi \div 0);$$
(9)

$$L_{1} = \sqrt{L^{2} + (AB)^{2} + 2L(AB)\cos\delta}; \ (AB) = x_{A} + |x_{B}|;$$

где L_0 – расстояние между точкой O и осью вращения планки для крепления ваера; L_1 – расстояние от оси вращения планки для подключения ваера до прямой *BB* (*B* – точка закрепления цепи к доске); δ – угол между траловой дугой и плоскостью доски ($x_D z_D$); δ_0 – угол между плоскостью цепей и плоскостью доски; *AB* – расстояние между центрами отверстий в стрингере для крепления дуги и цепи, см. рис. 3.

Для получения области устойчивости доски на плоскости (y_0y_1) запишем уравнения:

$$\widetilde{M}_{Z}^{\alpha} = 0 \implies 0,67 \ y_{0} - 0,38 \ y_{1} - 2,56 = 0 \implies \frac{y_{0}}{0,262} + \frac{y_{1}}{-0,148} = 1.$$
(10)

$$\widetilde{M}_{X}^{\lambda} = 0 \Longrightarrow 0,197 \, y_{1} - 0,164 \, y_{0} - 0,7785 = 0 \Longrightarrow \frac{y_{0}}{-0,21} + \frac{y_{1}}{0,25} = 1.$$
(11)

Прямая (10) делит плоскость на две полуплоскости, в одной из которых выполняется условие $\tilde{M}_{Z}^{\alpha} < 0$, а в другой – $\tilde{M}_{Z}^{\alpha} > 0$. Прямая (11) делит плоскость $(y_{0}y_{1})$ на две полуплоскости, в одной из которых выполняется условие $\tilde{M}_{Z}^{\lambda} < 0$, а в другой – $\tilde{M}_{Z}^{\lambda} > 0$. В области устойчивости должны выполнятся два условия: $\tilde{M}_{Z}^{\alpha} < 0$, $\tilde{M}_{Z}^{\lambda} < 0$. Требования $y_{0} < 0, y_{1} > 0$ накладывают дополнительные ограничения на выбор области устойчивости траловой доски.

Области устойчивости доски проекта 2490, модернизированной В.А. Кузиком, показаны на рис. 5.



Рис. 5. Области, где выполняются условия продольной и поперечной устойчивости траловых досок проекта 2490: а – $\tilde{M}_{z}^{\alpha} < 0$, $\tilde{M}_{x}^{\lambda} < 0$, $y_{0} < 0$, $y_{1} > 0$; $\delta - \tilde{M}_{z}^{\alpha} < 0$, $\tilde{M}_{x}^{\lambda} < 0$, $y_{0} < 0$ при креплении лапок в крайние отверстия планки, предложенной В.А. Кузиком

Fig. 5. Areas where the conditions of longitudinal and transverse stability of the trawl boards of project 2490 are fulfilled: a $\tilde{M}_z^{\alpha} < 0, \tilde{M}_x^{\lambda} < 0, y_0 < 0, y_1 > 0$; $\delta - \tilde{M}_z^{\alpha} < 0, \tilde{M}_x^{\lambda} < 0, y_0 < 0$ when attaching the legs to the extreme holes of the plank proposed by V.A. Kuzik

Рассмотрим результаты экспериментальных работ, проведённых 26 сентября 1988 г. Севастопольской базой подводных исследований. Эксперимент выполнялся на судне РТМС «Новоельня» типа «Прометей». На рис. 6 показан трал 118/620 м Находкинской БАМР с результатами выполненных замеров.



Puc. 6. Результаты экспериментальных исследований трала 118/620 м Fig. 6. Results of experimental studies of the 118/620 m trawl

Трал 118/620 м был вооружён досками площадью в плане $S=8 \text{ м}^2$. Замеренные параметры: углы атаки досок $\alpha_D = 17-19^\circ$, крен досок на спину $\lambda_D = 10-15^\circ$, угол между дугой и доской $\delta = 54-68^\circ$, глубина хода траловых досок $h_1 = 130$ м, расстояние между досками $B_D = 120$ м. Лапки доски крепились: верхняя – во второе отверстие, а нижняя – в четвертое отверстие, рис. 6. Использовался траловый мешок длиной 42,6 м.

Заключение

Сравнение расчётных данных с данными эксперимента показывает, что расчётные параметры досок близки к параметрам, замеренным на промысле, что подтверждает адекватность математических моделей (1–9), используемых при математическом моделировании.

Список источников

1. Аугулис П.П., Еремеев Ю.А. Новые конструкции траловых крыловидных досок // Рыбное хозяйство. 1985. № 6. С. 56–57.

2. Габрюк В.И. Механика орудий рыболовства в математических моделях, алгоритмах и компьютерных программах. Владивосток: Дальрыбвтуз, 2011. 519 с.

3. Габрюк В.И., Габрюк А.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ СМ-Warp – Компьютерное моделирование канатов для буксировки орудий рыболовства. № 2001611049, зарег. в Реестре программ для ЭВМ. Москва, 20.09.2001.

4. Карпенко В.П., Фридман А.Л. Устройства раскрытия рыболовных тралов. М.: Пищ. пром-сть, 1980. 248 с.

5. Корниенко И.А. Методика определения гидродинамических характеристик траловых досок при помощи программного пакета SolidWorks Flow Simulation // Изв. ТИНРО. 2016. Т. 185. С. 112–120.

6. Норинов Е.Г. Методы сбора информации для прогнозирования состояния биологических ресурсов рыболовства. Владивосток: Дальрыбвтуз, 1996. 100 с.

7. Рыкунов Э.М. Исследование работы семи конструкций траловых досок в пелагическом варианте траления // Изв. ТИНРО. 1972. Т. 84. С. 130–145.

8. Gabryuk V.I., Kudakaev V.V. Mathematical models that underlie computer simulation of the trawl doors for Mid-Water Trawls // Ocean and Polar Research. March 2020. Vol. 42(1): 1–12.

9. Reite K-J. Modeling and control of trawl systems. Doctoral thesis for the degree of doctor ingeniØr. Trondheim: NTNU, 2006. 250 p.

10. Stengel H., Fridman A.L. Fishfanggeräte. Berlin: Veb Verlag Technik, 1977. 332 s.

References

1. Augulis P.P., Yeremeev Yu.A. New designs of trawl wing-shaped boards // Fisheries. 1985. No. 6. pp. 56–57.

2. Gabryuk V.I. Mechanics of fishing implements in mathematical models, algorithms and computer programs. Vladivostok: Dalrybvtuz, 2011. 519 p.

3. Gabryuk V.I., Gabryuk A.V. Certificate of state registration of CM-Warp computer program – Computer modeling of ropes for towing fishing gear. No. 2001611049, Registered in the Register of Computer programs, Moscow 09/20/2001.

4. Karpenko V.P., Friedman A.L. Devices for opening fishing trawls. M.: Food. prom-st, 1980. 248 p.

5. Kornienko I.A. Methodology for determining the hydrodynamic characteristics of trawl boards using the SolidWorks Flow Simulation software package // From. TINRO. 2016. Vol. 185. pp. 112–120.

6. Norinov E.G. Methods of collecting information for predicting the state of biological fishing resources. Vladivostok: Dalrybvtuz, 1996. 100 p.

7. Rykunov E.M. Investigation of the work of seven designs of trawl boards in the pelagic version of trawling // Izv. TINRO. 1972. Vol. 84. pp. 130–145.

8. Gabryuk V.I., Kudakaev V.V. Mathematical models that underlie computer simulation of the trawl doors for Mid-Water Trawls // Ocean and Polar Research. March 2020. Vol. 42(1): 1–12.

9. Reite K-J. Modeling and control of trawl systems. Doctoral thesis for the degree of doctor ingeniØr. Trondheim: NTNU, 2006. 250 p.

10. Stengel H., Fridman A.L. Fishfanggeräte. Berlin: Veb Verlag Technik. 1977. 332 s.

Информация об авторах

В.И. Габрюк – консультант по проэктированию, доктор технических наук, профессор;

В.В. Кудакаев – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры промышленного рыболовства;

Е.Е. Мазур – директор ООО «Приморский канат».

Information about the authors

V.I. Gabruk – Technical design consultant, Doctor of Technical Sciences, Professor;

V.V. Kudakaev – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Industrial Fisheries;

E.E. Mazur – Director of Primorsky Rope LLC.

Статья поступила в редакцию 16.02.2024; одобрена после рецензирования 12.03.2024;

принята к публикации 18.03.2024.

The article was submitted 16.02.2024; approved after reviewing 12.03.2024; accepted for publication 18.03.2024.