

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ФОРМЫ ТРАЛА

А. И. СУЧКОВ

В результате интенсивной и непрерывной модернизации промысловая эффективность тралового флота достигла высокого уровня, а траловый лов по праву считается самым совершенным видом промышленного рыболовства. Однако и в траловом флоте возможно дальнейшее увеличение производственной рентабельности, существенное снижение промысловых затрат, уменьшение износа орудий лова и расхода сетчатых материалов за счет усовершенствования рыболовных орудий и увеличения их срока службы.

Основоположник науки по технике промышленного рыболовства Ф. И. Баранов [2] указывает, что «...покрой современного трала выработался ощупью при отсутствии возможности проверить целесообразность вводимых изменений, и попытка осмыслить этот покрой совершенно своевременна». Многочисленными рационализаторами за истекшие со времени возникновения тралового промысла 65—70 лет предложено огромное количество модификаций раскроя траловой сети, исчисляемое сотнями моделей.

В области проектирования тралов последнее время работали П. А. Старовойтов [12], В. Д. Гордеев [4], Н. А. Виноградов [3], И. Г. Смыслов [14], И. Р. Матросов [7], В. А. Саврасов [13] и многие другие исследователи, внесшие ряд оригинальных изменений в сложившуюся конструктивную схему рыболовных тралов.

Большое познавательное значение имеют также теоретические работы Н. Н. Андреева [1], С. Б. Гюльбадамова [5], Б. А. Попова [8], А. И. Трещева [17], А. И. Зонова [6], А. С. Ревина [11] и других советских ученых, однако законченного научного обоснования формы траловой сети до сих пор не дано.

Вместе с тем, очевидно, что при проектировании сетной части трала необходимо в первую очередь иметь исчерпывающее представление о форме, обеспечивающей его наилучшие эксплуатационные качества при наименьшей затрате материалов, т. е. минимальную поверхность или вес сетного полотна и максимальную площадь устья при заданном сопротивлении, лимитируемом буксирной способностью траулера [15].

Таким образом, вопрос о форме траловой сети относится к теории поверхностей и может быть аналитически решен методами дифференциальной геометрии.

Траловая сеть есть безмоментная оболочка, способная воспринимать только растягивающие усилия и без сопротивления изменяющая свою форму при сжатии или изгибе. Следовательно, форма трала целиком обусловлена соотношением гидродинамических и статических сил, действующих на элемент его поверхности. Полагая, что трал представляет собой фигуру, образованную вращением некоторой кривой вокруг од-

ной из координатных осей, выделим элемент поверхности в виде меридионально расположенной полоски единичной ширины и рассмотрим взаимодействие действующих на нее сил, (рис. 1), где

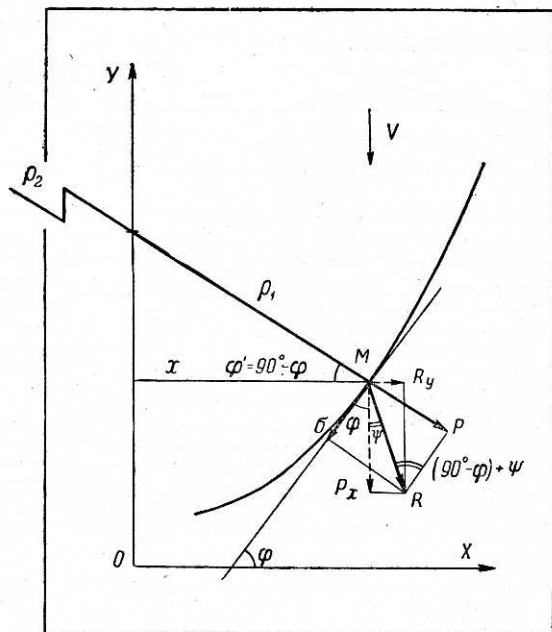


Рис. 1. Взаимодействие сил, действующих на сеточную полоску.

R — полное сопротивление или гидродинамическое давление;

q — вес полоски;

$\varphi' = \frac{\pi}{2} - \varphi$ — угол атаки.

Вектор R направлен по отношению к вектору скорости под углом $\psi < \frac{\pi}{2}$.

Модуль R есть функция от V , φ и $\frac{d}{a}$, т. е. отношения диаметра нитки к шагу ячеи.

Отношение $\frac{d}{a}$ является параметром дели, по величине составляет от 0,02 до 0,1 и более и может быть подобрано примерно одинаковым для всех пластин трала.

Скорость V при прочих равных условиях обусловлена буксирной способностью траулера, размерами трала и особенностями его оснастки.

Поскольку при тралении поддерживается стационарная скорость буксировки, значение вектора V постоянно.

Таким образом, вектор R по величине и направлению зависит только от угла φ .

Графический анализ современных тралов (рис. 2) показывает, что значение углов $\frac{\pi}{2} - \varphi$ для различных пластин трала лежат в пределах от 10 до 30°.

Значение R может быть определено экспериментальным путем посредством измерения составляющих его векторов: лобового сопротивления $R_x = R \cos \psi$, подъемной силы $R_y = R \sin \psi$, $\frac{R_y}{R_x} = \operatorname{tg} \psi = K$. — гидродинамическое качество дели.

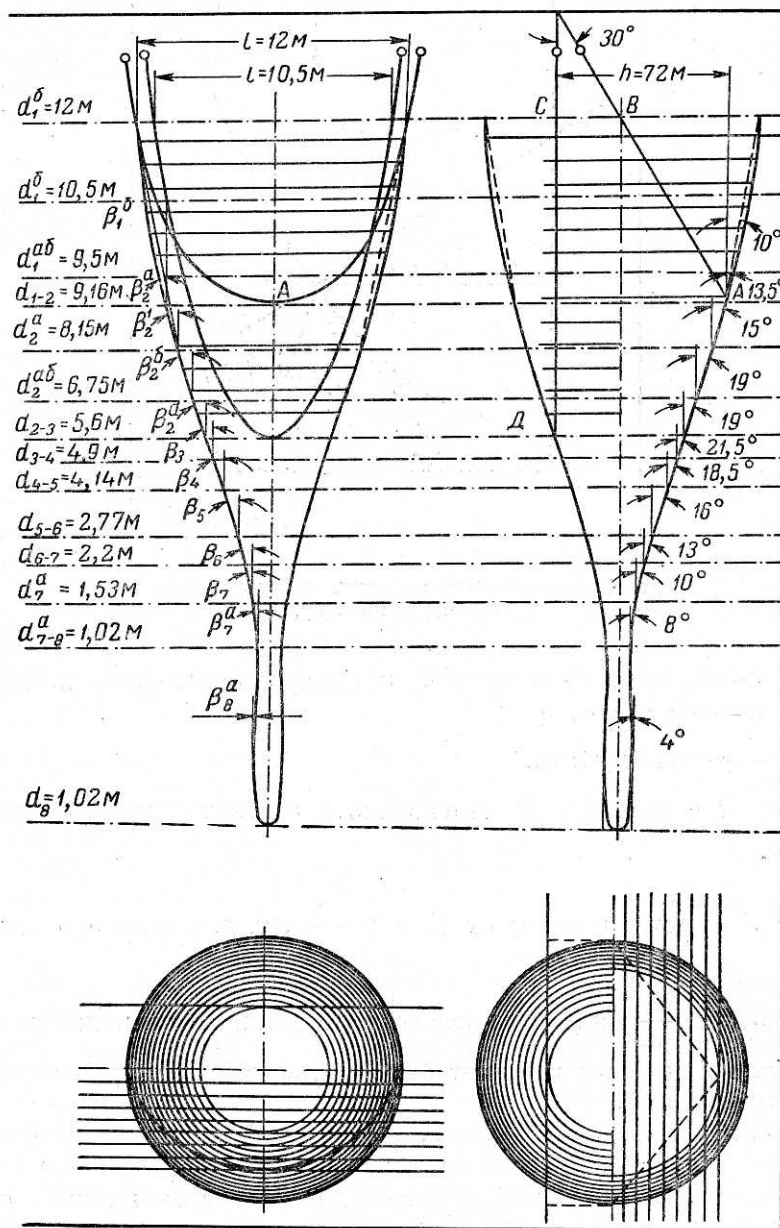


Рис. 2. Теоретический чертеж рыболовного траля.

По опытам А. Н. Покровского [9], аспиранта ВНИРО К. Л. Павлова и данным Ленинградского политехнического института при ψ от 10° до 40° величина K изменяется незначительно и может быть

принята постоянной (рис. 3). Например, для хлопчатобумажной дели 3,5/12—35 мм $\frac{d}{a} = 0,78$, $u_x = 0,36$ при $V = 1$ м/сек (рис. 3) (величина

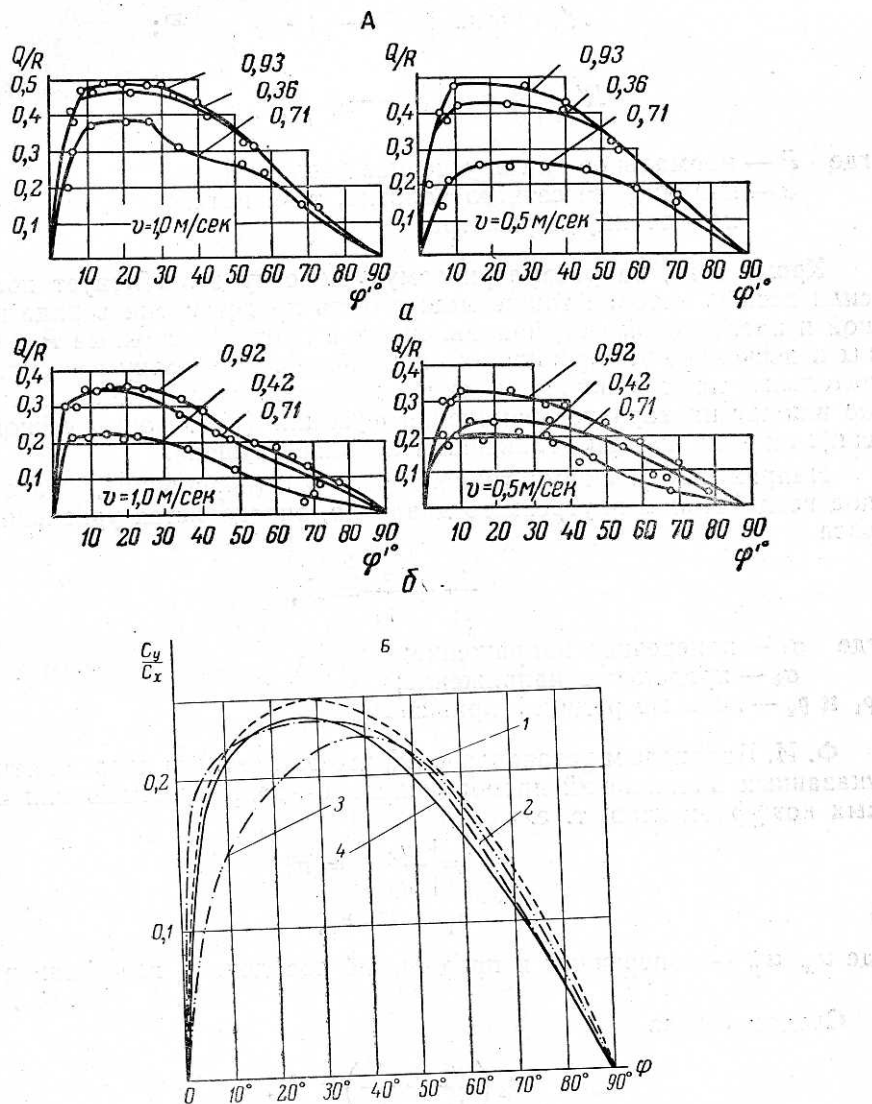


Рис. 3. Зависимость K от угла атаки φ' :

А — при различных коэффициентах посадки (по А. Н. Покровскому) (цифрами на графиках указаны значения коэффициента посадки u_x): а — х/б дель 3,5/12—35 мм, $\frac{d}{a} = 0,078$, $\frac{d}{s} = 0,0022$;
 б — х/б дель 27/30 — 42 мм, $\frac{d}{a} = 0,036$, $\frac{d}{s} = 0,0009$; Б — при постоянном коэффициенте посадки $u_x = 0,71$ (по данным ЛПИ-МЭБ): 1 — $d = 0,7$ мм, $a = 14$ мм; 2 — $d = 0,23$ мм, $a = 4,5$ мм; 3 — $d = 0,35$ мм, $a = 7$ мм; 4 — $d = 3$ мм, $a = 70$ мм; d — диаметр нитки, a — шаг ячеи (от узла до узла).

$K_{10^\circ} = 0,45$ и отличается от промежуточного значения K_{20° менее чем на 2%). При приведенных углах атаки K имеет максимальное значение, т. е. траловая дель находится в наиболее благоприятных условиях по отношению к подъемной силе, способствующей раскрытию орудия лова.

Для последующих расчетов гидродинамическое качество дельты K , принятое равным $K = K_{max} = 0,5$.

Вектор R разлагается на нормальную и касательную составляющие

$$R'_y = R \sin \left[\left(\frac{\pi}{2} - \varphi \right) + \psi \right] = P;$$

$$R'_x = R \cos \left[\left(\frac{\pi}{2} - \varphi \right) + \psi \right] = \sigma,$$

где P — нормальное или внутреннее давление;

σ — напряжение сетного полотна, т. е. натяжение, приходящееся на единицу периметра.

Кроме того, на рассматриваемую полосу воздействует постоянная сила веса q , которая также может быть представлена в виде нормальной и касательной сил, направленных в противоположные P и σ стороны и несколько уменьшающих их величину. Поскольку эти силы незначительны по сравнению с силами гидродинамического давления и не влияют на характер изменения функции (т. е. форму сетной полосы), их влияние при дальнейшем анализе опущено.

Напряжение и форма гибкой оболочки (перепонки), находящейся под воздействием внутреннего давления, определяется уравнением Лапласа

$$\frac{\sigma_1}{\rho_1} + \frac{\sigma_2}{\rho_2} = P,$$

где σ_1 — поперечное напряжение;

σ_2 — продольное напряжение;

ρ_1 и ρ_2 — главные радиусы кривизны.

Ф. И. Барановым установлено [2], что для сетного полотна отношение указанных напряжений пропорционально квадрату отношения посадочных коэффициентов, т. е.

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \left| \frac{u_x}{u_y} \right|^2 = u^2$$

и

$$\sigma_1 = u^2 \cdot \sigma_2,$$

где u_x , u_y — поперечный и продольный посадочные коэффициенты.

Следовательно

$$\sigma_2 \left(\frac{u^2}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right) = P,$$

но

$$\rho_1 = \frac{x}{\sin \varphi}; \quad \frac{1}{\rho_2} = \kappa,$$

где κ — кривизна полосы в продольном направлении и

$$\sigma_2 = \sigma = R \cos \left[\left(\frac{\pi}{2} - \varphi \right) + \psi \right],$$

$$R \cos \left[\left(\frac{\pi}{2} - \varphi \right) + \psi \right] \left(\frac{u^2}{x} \sin \varphi + \kappa \right) = R \sin \left[\left(\frac{\pi}{2} - \varphi \right) + \psi \right].$$

Отсюда

$$\kappa = \operatorname{tg} \left[\left(\frac{\pi}{2} - \varphi \right) + \psi \right] - \frac{u^2}{x} \sin \varphi. \quad (I)$$

Но

$$\operatorname{tg}\left[\left(\frac{\pi}{2}-\varphi\right)+\psi\right]=\frac{\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2}-\varphi\right)+\operatorname{tg}\psi}{1-\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2}-\varphi\right)\cdot\operatorname{tg}\psi}=\frac{1+K\operatorname{tg}\varphi}{\operatorname{tg}\varphi-K}$$

и

$$K=\frac{y''}{(1+y'^2)^{3/2}}=\frac{(\operatorname{tg}\varphi)'}{(1+\operatorname{tg}^2\varphi)^{3/2}},$$

тогда

$$\frac{(\operatorname{tg}\varphi)'}{(1+\operatorname{tg}^2\varphi)^{3/2}}=\frac{1+K\operatorname{tg}\varphi}{\operatorname{tg}\varphi-K}-\frac{u^2}{x}\cdot\frac{\operatorname{tg}\varphi}{\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\varphi}},$$

или

$$\frac{1}{\cos^2\varphi}\cdot\frac{\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\varphi}}{(1+\operatorname{tg}^2\varphi)^{3/2}}=\frac{K\operatorname{tg}\varphi+1}{\operatorname{tg}\varphi-K}\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\varphi}-\frac{u^2}{x}\operatorname{tg}\varphi.$$

Но

$$\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\varphi}=1+\frac{1}{2}\operatorname{tg}^2\varphi-\frac{1}{8}\operatorname{tg}^4\varphi+\dots,$$

где уже третий член ряда может быть опущен без ущерба для точности анализа, поскольку на указанном выше диапазоне углов $\operatorname{tg}\varphi_{\text{ср}} = \operatorname{tg}20^\circ = 0,36$, а величина $\frac{1}{8}\operatorname{tg}^4\varphi \approx 10^{-3}$, т. е. третьего порядка малости по сравнению с первым членом.

Отсюда

$$\frac{(Ky'+1)(y'^2+2)}{2(y'-K)}=\frac{u^2}{x}y'+1, \quad (\text{II})$$

где $y' = \operatorname{tg}\varphi = \frac{dy}{dx}$ — производная искомой функции y по x .

Произведем преобразования

$$(Ky'+1)(y'^2+2)\cdot x=(u^2y'+x)(y'-K)\cdot 2;$$

$$Ky'^3\cdot x+(x-2u^2)\cdot y'^2+2(Kx+Ku^2-x)y'+2(1+K)\cdot x=0;$$

$$y'^3+\left(\frac{1}{K}-\frac{2u}{Kx}\right)^2y'+2\left(1-\frac{1}{K}+\frac{u^2}{x}\right)\cdot y'+2\left(1+\frac{1}{K}\right)=0.$$

$$\text{При } K=K_{\max}=\frac{1}{2} \text{ и } u^2=\left|\frac{0,5}{0,87}\right|^2=\frac{1}{3};$$

$$y'^3+2\left(1-\frac{2}{3x}\right)y'^2-\left(1-\frac{1}{3x}\right)y'+6=0.$$

Вводя вместо y' новую переменную

$$Z=y'+\frac{2}{3}\left(1-\frac{2}{3x}\right),$$

приведем рассматриваемое уравнение к виду

$$Z^3+3PZ+2q=0,$$

где

$$3P=\frac{1}{3}\left[\left(-3\right)\left(1-\frac{1}{3x}\right)-4\left(1-\frac{2}{3x}\right)^2\right];$$

$$P = -\frac{0,78}{x^2}(x^3 - 0,91x + 0,25) \simeq -\left(0,88 \frac{x-0,45}{x}\right)^2;$$

$$2q = 2\left[\frac{2}{3}\left(1 - \frac{2}{3x}\right)\right]^3 + \frac{2}{3}\left(1 - \frac{2}{3x}\right)\left(1 - \frac{1}{3x}\right) + 6;$$

$$q = \left[\frac{2}{3}\left(1 - \frac{2}{3x}\right)\right]^3 + \frac{1}{3}\left(1 - \frac{2}{3x}\right)\left(1 - \frac{1}{3x}\right) = \\ = 3,63 \frac{x^3 - 0,25x + 0,13x - 0,02}{x^3}.$$

При $x > 1$ дискриминант

$$D = q^2 + P^3 = \\ = \frac{(12,67x^6 + 0,58x^3 + 0,82x^2) - (5,28x^5 + 0,61x^4 + 0,18x + 0,014)}{x^6} > 0.$$

Следовательно, рассматриваемое уравнение имеет вещественный корень.

Вспомогательные величины [17]

$$r = \sqrt{|P|} = 0,88 \frac{x-0,45}{x};$$

$$\operatorname{ch} \varphi^0 = \frac{q}{r^3} = 5,34 \cdot \frac{x^3 - 0,25x^2 + 0,13x - 0,02}{(x-0,45)^3};$$

$$\varphi_0 = \operatorname{arcsinh} \left[5,34 \cdot \frac{x^3 - 0,25x^2 + 0,13x - 0,02}{(x-0,45)^3} \right].$$

Правая часть последнего выражения больше 1, а значение φ_0 может быть представлено в виде

$$\varphi_0 = \ln 10,69 \frac{x^3 - 0,25x^2 + 0,13x - 0,02}{(x-0,45)^3} - 0,008 \frac{(x-0,45)^6}{(x^3 - 0,25x^2 + 0,13x - 0,02)^2},$$

в котором уже второй член имеет ничтожно малую величину.

Представляя оставшийся член в виде логарифмического ряда, получим

$$\frac{\varphi_0}{3} = 0,33 \left\{ \frac{10,69(x^3 - 0,25x^2 + 0,13x - 0,02) - (x-0,45)^3}{10,69(x^3 - 0,25x^2 + 0,13x - 0,02)} + \right. \\ \left. + 0,5 \left[\frac{10,69(x^3 - 0,25x^2 + 0,13x - 0,02) - (x-0,45)^3}{10,69(x^3 - 0,25x^2 + 0,13x - 0,02)} \right]^2 + \dots \right\} = \\ = 0,33 \left[0,91 \frac{x^3 - 0,136x^2 + 0,08x - 0,04}{x^3 - 0,25x^2 + 0,13x - 0,02} + \right. \\ \left. + \frac{0,91^2}{2} \left(\frac{x^3 - 0,136x^2 + 0,08x - 0,04}{x^3 - 0,25x^2 + 0,13x - 0,02} \right)^2 + \dots \right].$$

Но при $x > 1$, применив правило Лопиталья, найдем

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{(x^3 - 0,36x^2 + 0,08x - 0,04)'}{(x^3 - 0,25x^2 + 0,13x - 0,02)'} = \\ \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{(3x^2 - 0,27x + 0,08)'}{(3x^2 - 0,5x + 0,13)'} = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{(6x - 0,27)'}{(6x - 0,5)'} = 1$$

величина дроби составляет 1,045, т. е. близка к пределу.

Следовательно,

$$\frac{\varphi_0}{3} \simeq 0,33 \left(0,91 + \frac{0,91^2}{2} + \frac{0,91^3}{3} + \dots \right) 0, \simeq 52;$$

$$\operatorname{ch} \frac{\varphi_0}{3} = \operatorname{ch} 0,52 = 1,14;$$

$$Z = -2r \operatorname{ch} \frac{\varphi_0}{3} = -1,76 \cdot 1,14 \frac{x^{-0,45}}{x} = -2 \frac{x^{-0,45}}{x} = \frac{dy}{dx} + \frac{2}{3} \left(1 - \frac{2}{3x}\right),$$

$$\frac{dy}{dx} = -2 \frac{x^{-0,45}}{x} + \frac{4}{9x} - \frac{2}{3} = 1,32 \left(\frac{1}{x} - 2\right).$$

Отсюда

$$y = 1,32 \int \left(\frac{1}{x} - 2\right) dx = 1,32 (\ln x - 2x) + c.$$

При $x = 0$ и $y = 0$ $c = 0$.

Окончательно

$$y = 1,32 (\ln x - 2x). \quad (\text{III})$$

При изменении аргумента от 1 до 10 значение функции выразится данными, приведенными в таблице.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,0	0,7	1,1	1,4	1,6	1,8	2,1	2,1	2,2	2,3
2,0	3,3	4,9	6,6	8,4	10,2	12,0	13,9	15,8	17,7
2,6	4,4	6,5	8,7	11,1	13,5	15,8	18,4	20,9	23,4
0,38	0,46	0,46	0,46	0,45	0,45	0,44	0,44	0,43	0,43

График функции 3, изображенный на рис. 4 в зеркальном отображении близок по начертанию к прямой линии.

В результате проведенного исследования формы, принимаемой сетной оболочкой в потоке, при условии постоянства V , параметра $\frac{d}{a}$

и посадочных коэффициентов $\frac{u_x}{u_y}$ установлено, что сеть принимает форму тела вращения, близкого к конусу, поскольку образующая этого тела изображается слабо вогнутой линией.

Угол наклона образующей по отношению к оси ординат или направлению вектора скорости $\varphi' = \frac{\pi}{2} - \varphi$ в рассматриваемом случае при гидродинамическом качестве дельты $K = 0,5$, типичным для углов атаки траловых пластин, определяется

$$\operatorname{tg} \varphi' = \frac{x}{y} \simeq 0,44$$

и составляет 24° .

Следует отметить, что на практике для рыболовных тралов указанный угол берется равным $14-15^\circ$.

В свете изложенного это положение нельзя признать правильным, так как уменьшение угла φ' вызывает удлинение образующей сетного конуса и соответствующее увеличение площади боковой поверхности, а в конечном счете повышение расхода сетематериалов, идущих на его изготовление.

Очевидно, при заданном объеме и круговом основании, минимальная боковая поверхность тела вращения, описанного вокруг указанной окружности, будет у полусферы.

Поскольку трал представляет собой конус, можно определить параметры конуса, имеющего наименьшую боковую поверхность, описанного вокруг полусферы.

При этом в качестве независимого параметра удобно взять угол φ' (рис. 5).

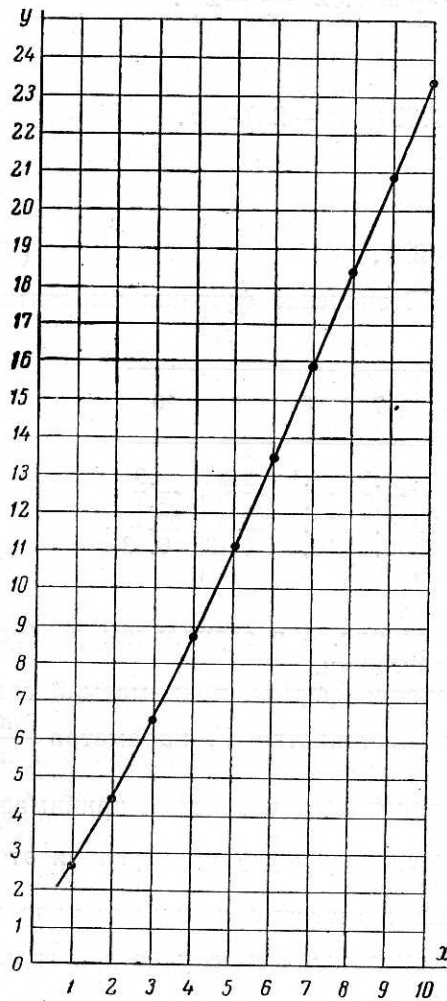


Рис. 4. График образующий трала.

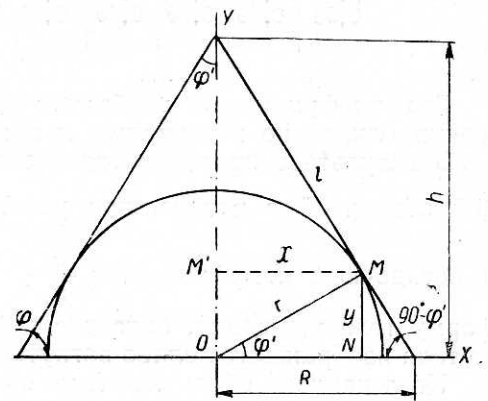


Рис. 5. Взаимосвязь конуса и полусферы.

При обозначениях на рис. 5 будем иметь

$$R = \frac{r}{\cos \varphi'}; \quad h = \frac{r}{\sin \varphi'}; \quad l = \frac{h}{\cos \varphi'} = \frac{r}{\sin \varphi' \cos \varphi'};$$

Боковая поверхность конуса

$$S_{\text{БОК}} = \pi R l = \pi \frac{r^2}{\cos^2 \varphi' \sin \varphi'}.$$

Для того чтобы боковая поверхность конуса имела наименьшее значение, необходимо, чтобы выражение $\cos^2 \varphi' \sin \varphi'$, стоящее в знаменателе, получило свое наибольшее значение при изменении от 0 до $\frac{\pi}{2}$.

Производная

$$(\cos^2 \varphi' \sin \varphi')' = -2 \cos \varphi' \sin^2 \varphi' + \cos^3 \varphi' = 2 \cos^2 \varphi' \left(\frac{1}{2} - \text{tg}^2 \varphi' \right).$$

В указанном промежутке производная обращается в нуль лишь при

$$\operatorname{tg} \varphi' = \frac{1}{\sqrt{2}}, \text{ т. е. при } \varphi' = \operatorname{arctg} 0,707 = 35^\circ 15' 52''.$$

Этот угол и будет определять оптимальные с точки зрения расхода сетематериалов размеры трала.

ВЫВОДЫ

1. Форма траловой сети обусловлена соотношением гидродинамических и статических сил, действующих на элемент ее поверхности, и структурой самой сети, определяемой параметрами

$$\frac{d}{a} \text{ и } \frac{u_x}{u_y}.$$

2. При постоянных V , $\frac{d}{a}$, $\frac{u_x}{u_y}$ и $K = K_{\max} = 0,5$

траловая сеть имеет форму тела вращения, близкого к конусу, поскольку образующая этого тела изображается слабо вогнутой линией, имеющей уравнение

$$y = 1,32(\ln x - 2x).$$

3. Расчетный угол наклона образующей трала по отношению к его оси или направлению вектора скорости при гидродинамическом качестве деля $K \approx 0,5$, типичном для траловых пластин, определяется

$$\operatorname{tg} \varphi' = \frac{x}{y} \text{ и составляет около } 24^\circ.$$

4. Конусная траловая сеть имеет минимальную боковую поверхность при $\varphi' \approx 35^\circ$, т. е. несколько большим, чем расчетный угол.

5. Анализ формы трала выполнен в первом приближении с указанными допущениями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев Н. Н. Дифференциальное определение посадочного коэффициента. Труды Мосрыбвтуза. Вып. V, Пищепромиздат, 1953.
2. Баранов Ф. И. Техника промышленного рыболовства. М., Пищепромиздат, 1960.
3. Виноградов Н. Н. Влияние раскрытия, размеров и посадки отдельных частей сетного мешка трала на рабочие параметры его устья. БТИ Мурманского СХХ, Мурманск, 1960.
4. Гордеев В. Д. Рациональная форма тралового мешка. «Известия ТИНРО» № 35, Владивосток, 1951.
5. Гюльбадамов С. Б. Промыслово-биологические основы проектирования пелагических тралов. Труды ВНИРО. Т. XXXVI, М., Пищепромиздат, 1958.
6. Зонов А. И. К расчету формы рыболовных сетей. «Научно-техн. бюллетень ВНИОРХ» № 5, Л., 1957.
7. Матросов И. Р. Теоретические основы для расчета движения судна с тралом. «Рыбное хозяйство» № 6, М., 1961.
8. Попов Б. А. О подъемной силе сети, помещенной в поток. Труды ВНИРО. Т. XXX, М., Пищепромиздат, 1955.
9. Покровский А. Н. Опыты по определению распорной силы плоской сети при движении ее в воде. Труды ВНИРО. Т. XLI, Пищепромиздат, 1959.
10. Прандтль Л. Гидродинамика вязкой жидкости. Изд-во иностр. лит-ры. М., 1956.
11. Ревин А. С. Исследование влияния структуры и формы траловой сети на ее сопротивление в потоке воды. Труды ВНИРО. Т. XLI, Пищепромиздат, 1959.

12. Старовойтов П. А. Направление и методика научно-исследовательских работ по проектированию тралов и совершенствованию техники тралового лова. БТИ Мурманского СНХ., Мурманск, 1960.

13. Саврасов В. А. Новые методы работы тралом. Изд-во журнала «Рыбное хозяйство», М., 1959.

14. Смыслов И. Г. Исследование факторов, определяющих равновесие и раскрытие разноглубинного трала. Труды ВНИРО. Т. XLI, Пищепромиздат, 1959.

15. Сучков А. И. Графоаналитический метод определения проектных параметров придонных (салачных) тралов. Информац. сборник ВНИРО № 6, М., 1960.

16. Семендяев К. А., Бронштейн И. И. Справочник по математике. Тех. теорет. издат. М., 1955.

17. Трещев А. И. Теоретические основы лова рыбы разноглубинным тралом. Труды ВНИРО. Т. XLI. М., Пищепромиздат, 1959.