

УДК 639.2.081.001.57

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КРЮЧКОВЫХ РЫБОЛОВНЫХ СИСТЕМ

**Габрюк В.И.**

*Дальневосточный государственный бюджетный технический рыбохозяйственный университет,  
Владивосток, e-mail: festfu@mail.ru*

Аналитически исследуются крючковые рыболовные системы: удочки, троллы и ярусы. Получено общее аналитическое решение дифференциальных уравнений равновесия гибкого каната в покоящейся жидкости, являющееся обобщением работы И. Бернулли на случай, когда канат (хребтина крючкового яруса) легче воды. Это решение позволяет выполнять математическое моделирование любых крючковых рыболовных систем в покоящейся жидкости. Для дрейфующих крючковых ярусов и стационарных ярусов при наличии течений разработаны математические модели их элементов: рыболовного крючка, крючкового поводца, системы «наживка – крючок – поводец», узла крепления поводца к хребтине; гибкого каната в потоке; хребтины, якоря. На основе этих математических моделей на языке программирования Borland Delphi разработан программный комплекс CM-LongLine, позволяющий выполнять компьютерное моделирование всех типов ярусов при наличии течений. С разработкой математических моделей рыболовных систем промышленное рыболовство поднимается от ремесла, каким оно было до сих пор, до уровня точной науки, опирающейся на прочный фундамент математики, механики, физики, информатики и логики. Полученные в данной работе адекватные математические модели и компьютерные программы могут быть положены в основу новой науки «Математическое промышленное рыболовство на персональном компьютере».

**Ключевые слова:** рыболовный крючок, крючковый поводец, хребтина яруса, якорь, адекватные математические модели, компьютерное моделирование ярусов

## MATHEMATICAL MODELING OF THE HOOK FISHING SYSTEMS

**Gabryuk V.I.**

*Far eastern state technical fisheries university,  
Vladivostok, e-mail: festfu@mail.ru*

Are they Analytically researched hook fishing systems: fishing rods, troll and longlines. It Is Received general analytical decision of the differential equations of the balance to flexible cable in resting liquids, being generalization of the work I. Bernoulli on rallytea, when cable (mainline of the hook longline) easier water. This decision allows to execute mathematical modeling any hook fishing systems in resting liquids. For drift hook longlines and stationary longlines at presence of the currents is designed mathematical models their element: fishing hook, hookline, systems «bait-hook-hookline», node of the fastening hookline to mainline; the flexible tightrope in flow; mainline, anchor. On base these mathematical models on programming language Borland Delphi is designed programme complex CM-LongLine, allowing execute computer modeling of all types tier at presence of the currents. With development of the mathematical models of the fishing systems industrial fishing rises from craft, what it was hitherto, before level of the exact science, resting in firm foundation mathematicians, mechanical engineers, physicists, informatics and logic. Got in given work to identical mathematical models and computer about-grams can be prescribed in base of the new science «Mathematical industrial fishing on personal computer».

**Keywords:** fishing hook, hookline, mainline of the longline, anchor, identical mathematical models, computer modeling of the longline

Математическое моделирование в технике [3–9] является важнейшим инструментом познания реального Мира. Под математическим моделированием понимают замену исследуемого технического устройства математической моделью и его изучение методами вычислительной математики с использованием современной компьютерной техники.

Объектом исследования являются крючковые рыболовные системы: удочки, троллы и ярусы. Основными крючковыми орудиями рыболовства являются пелагические, донные и придонные горизонтальные ярусы (рис. 1), которые широко используются для лова таких рыб, как тунец, акула, меч-рыба, треска, чёрный палтус, окунь, терпуг, угольная рыба.

Ярус представляет собой длинный канат (хребтину), к которому на определённом расстоянии друг от друга крепятся поводцы с рыболовными крючками. Ярус набирается из отдельных секций. Секция яруса (section of the longline) – это отрезок хребтины с огонами на концах. В секции яруса размещается от шести для тунцеловных ярусов до 300 крючков при лове трески и палтуса. Ярусы отличает простота конструкции, высокое качество улова, способность облавливать гидробионты на любых глубинах и при наличии сложных грунтов, когда иные орудия использовать невозможно.

**Целью исследования** является получение математических моделей элементов крючковых орудий рыболовства (рыболовного крючка, крючкового поводца, узла кре-

пления поводца к хребтине, системы «рыболовный крючок – наживка – поводец»; гибкого каната как в потоке, так и в покоящейся жидкости; хребтины яруса, якорей с подъякорниками и без них), необходимых для математического моделирования крючковых рыболовных систем: удочек, троллов; горизонтальных, вертикальных и комбинированных крючковых ярусов как стационарных, так и дрейфующих.

**Земная система координат (ЗСК)** задаётся векторами  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ . Вектор  $\vec{k}$  направлен по отвесу, то есть  $\vec{k} \parallel \vec{g}$  ( $\vec{g}$  – ускорение свободного падения). Векторы  $\vec{i}, \vec{j}$  лежат в плоскости горизонта. Эта система используется для задания положения каната относительно Земли и определения его формы. Форма каната задается выражением

$$\vec{r}(l) = x(l)\vec{i} + y(l)\vec{j} + z(l)\vec{k},$$

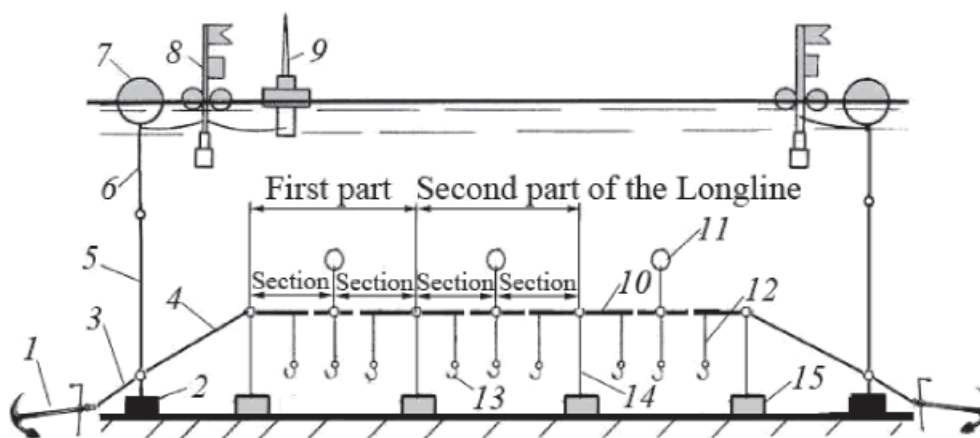


Рис. 1. Горизонтальный придонный ярус:

1 – якорь; 2 – подъякорник; 3 – якорный трос; 4 – якорный линь; 5 – плавучий линь; 6 – линь якорного буйа; 7 – якорный буй; 8 – буй-веха; 9 – радиобуй; 10 – хребтина; 11 – поплавок; 12 – поводец; 13 – рыболовный крючок; 14 – грузовой линь; 15 – груз

## Материалы и методы исследования

### Математическая модель гибкого каната в потоке

Гибкий канат является основным элементом любых крючковых рыболовных систем, поэтому его математическая модель лежит в основе их моделирования. Векторное дифференциальное уравнение равновесия гибкого каната в потоке имеет вид [1–3]

$$\frac{d(T\vec{\tau})}{dl} + \vec{q} + \vec{r}_w = \frac{dT}{dl} \cdot \vec{\tau} + \frac{T \cdot d\vec{\tau}}{dl} + \vec{q} + \vec{r}_w = \vec{0}. \quad (1)$$

Здесь  $T$  – натяжение каната в текущей точке;  $\vec{\tau}$  – орт касательной оси каната, направленный в сторону роста дуговых координат  $l$ ;  $\vec{q}$  – вес в воде 1 м каната;  $\vec{r}_w$  – гидродинамическая сила, приходящаяся на 1 м каната.

Скалярные дифференциальные уравнения равновесия каната получаются путём проецирования векторного уравнения (1) на оси какой-либо системы координат. Канаты орудий рыболовства работают в воде, поэтому при их исследовании используется три системы координат: земная ( $\vec{i}\vec{j}\vec{k}$ ), естественная ( $\vec{\tau}\vec{n}\vec{b}$ ) и поточная ( $\vec{i}_v\vec{j}_v\vec{k}_v$ ).

где  $\vec{r}$ ;  $x, y, z$ ;  $l$  – радиус-вектор, декартовы и дуговая координаты текущей точки оси каната.

**Естественная система координат (ЕСК)** каната задаётся векторами  $\vec{\tau}, \vec{n}, \vec{b}$ :

$$\vec{\tau} = d\vec{r} / dl = \dot{x}\vec{i} + \dot{y}\vec{j} + \dot{z}\vec{k};$$

$$\vec{n} = \frac{d\vec{\tau} / dl}{K} = \frac{d^2\vec{r} / dl^2}{K} = \frac{\ddot{x}\vec{i} + \ddot{y}\vec{j} + \ddot{z}\vec{k}}{K};$$

$$\vec{b} = \vec{\tau} \times \vec{n} = \frac{(y\ddot{z} - \dot{y}\dot{z})\vec{i} + (x\ddot{z} - \dot{x}\dot{z})\vec{j} + (x\dot{y} - \dot{x}y)\vec{k}}{K}.$$

Здесь  $\vec{\tau}, \vec{n}, \vec{b}$  – орты касательной, главной нормали и бинормали оси каната;  $\equiv d / dl$  – символ производной по дуговой координате;  $K = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}$  – кривизна оси каната.

**Поточная система координат каната (ПСК)** задаётся векторами  $\vec{i}_v, \vec{j}_v, \vec{k}_v$ :

$$\vec{i}_v \uparrow \downarrow \vec{V}, \vec{k}_v \subset (\vec{\tau}\vec{V}).$$

Здесь  $\vec{V}$  – скорость потока. Эта система используется при определении гидродинамических сил, действующих на канат в потоке.

Если скорость потока  $\vec{V}$  лежит в плоскости горизонта, то ось абсцисс земной

системы координат  $x$  направляют по оси  $x_{z_0}$  рис. 2. В этом случае ориентация поточной системы координат относительно земной определяется углом  $\varphi$  между осями  $z$  и  $z_{z_0}$ , называемым углом крена плоскости потока каната ( $\tau \vec{V}$ ).

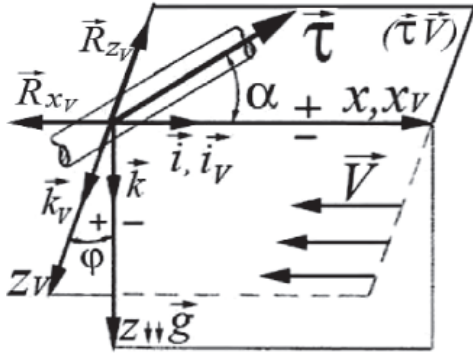


Рис. 2. Земная  $x, y, z$  и поточная  $x_V, y_V, z_V$  системы координат каната;  $(\tau \vec{V})$  – плоскость потока каната;  $\alpha$  – угол атаки каната;

$\varphi$  – угол крена плоскости потока каната

Проецируя векторное уравнение (1) на оси поточной системы и учитывая, что

$$\vec{\tau} = \cos \alpha \vec{i}_V - \sin \alpha \vec{k}_V = \cos \alpha \vec{i} + \sin \alpha \sin \varphi \vec{j} - \sin \alpha \cos \varphi \vec{k};$$

$$d\vec{\tau} / dl = \vec{K} = K\vec{n} =$$

$$= -\dot{\alpha} \sin \alpha \vec{i}_V + \dot{\varphi} \sin \alpha \vec{j}_V - \dot{\alpha} \cos \alpha \vec{k}_V;$$

$$\vec{q} = q_z \vec{k} = q_z (\sin \varphi \vec{j}_V + \cos \varphi \vec{k}_V);$$

$$\vec{r}_W = r_{xV} \vec{i}_V + r_{yV} \vec{j}_V + r_{zV} \vec{k}_V,$$

после преобразований, получим

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

$$\dot{\alpha} = \frac{q_z \cos \alpha \cos \varphi + r_{xV} \sin \alpha_{xp} + r_{zV} \cos \alpha}{T};$$

$$\dot{\varphi} = \frac{-(q_z \sin \varphi + r_{yV})}{T \sin \alpha}; \quad (2)$$

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

$$q_z = k_w mg; \quad k_w = 1 - m_w / m;$$

$$R_x = T \cos \alpha - T_0 \cos \alpha_0,$$

где  $T_0, \alpha_0$ ;  $T, \alpha$  – натяжение каната и его угол атаки в начальной и текущей точках;  $q_z$  – проекция веса в воде 1 м каната на ось  $z$ ;  $\vec{g}$ ;  $m_w, m$  – масса воды, вытесненной 1 м каната и его линейная плотность;  $r_{xV}, r_{yV}, r_{zV}$  – проекции гидродинамической силы каната на оси поточной системы координат;  $R_x$  – гидродинамическое сопротивление каната.

Система дифференциальных уравнений (2) является математической моделью каната в потоке. Она позволяет находить семь функций:  $x(l), y(l), z(l), T(l), R_x(l), \alpha(l), \varphi(l)$ , определяющих форму каната в потоке  $x(l), y(l), z(l)$ , его натяжение  $T(l)$  и гидродинамическое сопротивление  $R_x(l)$ , а также его угол атаки  $\alpha(l)$  и угол крена плоскости потока  $\varphi(l)$ . Эта система записана в нормальной форме, наиболее удобной для её численного решения на ЭВМ.

### Проекция гидродинамической силы каната на оси поточной системы координат

$r_{xV}, r_{yV}, r_{zV}$  входящие в (2), зависят от его угла атаки  $\alpha$  и определяются экспериментально путём испытания канатов в аэродинамических трубах, гидроролках или в море. Их обычно записывают в форме Ньютона:

$$r_{xV} = C_{xV} (0,5\rho V^2) d, \quad (x_V, y_V, z_V).$$

Здесь  $d$  – диаметр каната;  $C_{xV}, C_{yV}, C_{zV}$  – коэффициенты гидродинамических сил. Эти коэффициенты удовлетворяют следующим условиям симметрии:

$$C_{xV, yV, zV}(\alpha) = C_{xV, yV, zV}(\alpha + \pi);$$

$$C_{xV}(-\alpha) = C_{xV}(\alpha); \quad C_{yV, zV}(-\alpha) = -C_{yV, zV}(\alpha),$$

то есть они являются периодическими функциями угла атаки  $\alpha$  с периодом  $\pi$ , причём  $C_{xV}(\alpha)$  – чётная функция, а  $C_{yV, zV}(\alpha)$  – нечётные функции. Они также удовлетворяют граничным условиям:

$$C_{yV, zV}(0) = C_{yV, zV}(-0) = 0;$$

$$C_{yV, zV}(90) = C_{yV, zV}(-90) = 0.$$

Условиям симметрии и граничным условиям удовлетворяют следующие функции:

$$C_{xV} = -(c_{11} \sin^2 \alpha + c_{12} \sin^4 \alpha + c_{13} \cos^2 \alpha), \quad \alpha \in (-\infty, \infty);$$

$$C_{yV} = \pm (c_{21} \sin \alpha \cos \alpha + c_{22} \sin^3 \alpha \cos \alpha), \quad \alpha \in (-\infty, \infty);$$

$$C_{zV} = -(c_{31} \sin \alpha \cos \alpha + c_{32} \sin^3 \alpha \cos \alpha), \quad \alpha \in (-\infty, \infty),$$

где  $c_{ij}$  – коэффициенты, зависящие от материала каната, числа наружных прядей, отношения длины каната к его диаметру  $l/d$  (при  $l/d > 100$  канат можно рассматривать как канат бесконечного удлинения). Знак (+) во второй из формул относится к канатам правой свивки наружных прядей, знак (–) – канатам левой свивки.

Для получения дифференциальных уравнений равновесия каната в естественных осях умножим уравнение (1) скалярно на  $\vec{\tau}$ ,  $\vec{n}$ ,  $\vec{b}$ , получим

$$dT/dl + q_\tau + r_\tau = 0; \quad T \cdot K + q_n + r_n = 0;$$

$$q_b + r_b = 0.$$

Здесь

$$q_\tau = \vec{q} \cdot \vec{\tau} = q_z \vec{k} \cdot \vec{\tau} = \dot{z} \cdot q_z = -q_z \sin \alpha \cos \varphi;$$

$$q_n = \vec{q} \cdot \vec{n} = q_z \vec{k} \cdot \vec{n} = \frac{(\dot{z} \cdot q_z)}{K} = \frac{q_z (\dot{\varphi} \sin \alpha \sin \varphi - \dot{\alpha} \cos \alpha \cos \varphi)}{K};$$

$$q_b = \vec{q} \cdot \vec{b} = q_z \vec{k} \cdot \vec{b} = q_z \vec{k} \cdot (\vec{\tau} \times \vec{n}) = \frac{q_z (\dot{x}\dot{y} - \dot{y}\dot{x})}{K} = \frac{q_z (\dot{\alpha} \sin \varphi - \dot{\varphi} \sin \alpha \cos \alpha \cos \varphi)}{K};$$

$$r_\tau = \vec{r}_w \cdot \vec{\tau} = r_{XV} \cos \alpha - r_{ZV} \sin \alpha;$$

$$r_n = \vec{r}_w \cdot \vec{n} =$$

$$= \frac{-r_{XV} \cdot \dot{\alpha} \cdot \sin \alpha + r_{YV} \cdot \dot{\varphi} \cdot \sin \alpha - r_{ZV} \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos \alpha}{K};$$

$$r_b = \vec{r}_w \cdot \vec{b} =$$

$$= \frac{r_{XV} \cdot \dot{\varphi} \cdot \sin^2 \alpha + r_{YV} \cdot \dot{\alpha} + r_{ZV} \cdot \dot{\varphi} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha}{K};$$

$$K = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2} = \sqrt{\dot{\alpha}^2 + \dot{\varphi}^2 \sin^2 \alpha},$$

где  $K$  – кривизна оси каната;  $q_\tau$ ,  $q_n$ ,  $q_b$ ,  $r_\tau$ ,  $r_n$ ,  $r_b$  – проекции веса 1 м каната в воде и гидродинамической силы, приходящейся на 1 м каната, на естественные оси.

Для моделирования стационарных ярусных систем в покоящейся жидкости рассмотрим равновесие каната в покоящейся жидкости. Эта задача решена И. Бернулли [10] для случая, когда плотность материала каната больше плотности жидкости.

Равновесие канатов в покоящейся жидкости описывается векторным диффе-

ренциальным уравнением, получаемым из (1) при  $\vec{r}_w = 0$ :

$$\frac{d(T\vec{\tau})}{dl} + \vec{q} = \frac{d[T(\dot{x}\vec{i} + \dot{z}\vec{k})]}{dl} + q_z \vec{k} = \frac{d(T\dot{x})}{dl} \cdot \vec{i} + d(T\dot{z}) \cdot \vec{k} + q_z \vec{k} = \vec{0}. \quad (3)$$

Так как силы  $\vec{q}$  параллельны оси  $z$ , то канат лежит в плоскости  $(xz)$ , поэтому  $y \equiv 0$ . Проецируя уравнение (3) на оси  $x$  и  $z$  земной системы координат, получим дифференциальные уравнения равновесия гибкого каната в покоящейся жидкости:

$$\frac{d(T\dot{x})}{dl} = 0; \quad \frac{d(T\dot{z})}{dl} = -q_z. \quad (4)$$

Общее решение системы (4) имеет вид: при  $q_z \neq 0$ :

$$x = p_x [\operatorname{arsh}((l + C_3)/p_x) - C_1];$$

$$z = p_x \cdot \operatorname{ch}(x/p_x + C_1) - C_2;$$

$$l = p_x \cdot \operatorname{sh}(x/p_x + C_1) - C_3;$$

$$C_1 = \operatorname{arsh}(T_{AZ}/T_{AX});$$

$$C_2 = p_x \cdot \operatorname{ch} C_1; \quad C_3 = p_x \cdot \operatorname{sh} C_1;$$

$$T_{AZ} = 0,5 q_z \left[ l_k \pm z_{BA} \sqrt{1 + 4p_x^2 / (l_k^2 - h_{BA}^2)} \right];$$

$$(+)\text{ – при } q_z > 0, (-)\text{ – при } q_z < 0; \quad (5)$$

$$T_{AX} = 0,5 |q_z| \sqrt{[(2p_z - l_k)^2 - h_{BA}^2] (l_k^2 - h_{BA}^2)} / h_{BA};$$

$$p_x = \frac{-T_{AX}}{q_z}; \quad p_z = \frac{T_{AZ}}{q_z};$$

$$T_B = T_A - q_z \cdot z_{BA}; \quad z_{BA} = z_B - z_A;$$

$$h_{BA} = |z_B - z_A|; \quad q_z = k_w G_z = k_w mg;$$

$$k_w = 1 - m_w / m;$$

при  $q_z = 0$ :  $T = C_4 = \text{const}$ ;  $z = C_5 x + C_6$ , где  $m_w$  – масса воды, вытесненной 1 м каната;  $m$  – линейная плотность каната;  $q_z$  – проекция на ось  $z$  веса в воде 1 м каната;  $k_w$  – коэффициент веса каната в воде;  $l$  – дуговая координата текущей точки каната;  $l_k$  – длина каната;  $C_1, \dots, C_6$  – константы интегрирования;  $z_A, z_B$  – аппликаты начальной и конечной точек каната;  $p_x, p_z$  – параметры каната;  $T_{AX}, T_{AZ}$  – проекции натяжения каната в начальной точке  $A$  на оси  $x$  и  $z$ , рис. 3.

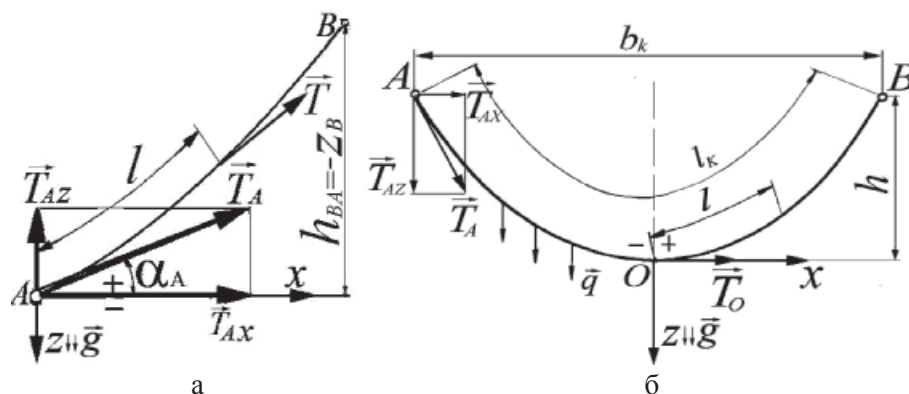


Рис. 3. Параметры:  
а – несимметричного каната; б – симметричного каната

Система (5) является развитием работы [10] на случай, когда канат может быть как тяжелее воды (сталь, полиамид, полиэстер), так и легче воды (полиэтилен, полипропилен, дэнлайн).

При получении уравнений (5) использовалась система координат  $xz$ , ось  $z$  которой направлена по ускорению свободного падения, т.е.  $z \downarrow \downarrow \vec{g}$ . Кроме того, дифференциал дуговой координаты определялся по формуле  $dl = \sqrt{1 + (dz/dx)^2} dx$ , где перед радикалом взят знак (+). Она верна только тогда, когда дифференциалы дуговой координаты  $dl$  и абсциссы  $dx$  имеют одинаковые знаки. Поэтому ось  $x$  необходимо направлять в ту сторону, чтобы с ростом дуговых координат росли и абсциссы, как показано на рис. 3. Это обстоятельство необходимо учитывать при решении конкретных задач.

Система (5) является общей математической моделью однородного неподвижного гибкого каната в покоящейся жидкости. Она позволяет определять характеристики любых канатов в покоящейся воде, изготовленных из материалов как тяжелее воды, когда  $q_z > 0$  (сталь  $k_w = 0,87$ ; капрон  $k_w = 0,1$ ; полиэстер  $k_w = 0,126$ ), так и легче воды, когда  $q_z < 0$  (полиэтилен  $k_w = -0,068$ ; полипропилен  $k_w = -0,126$ ). Математическая модель (5) лежит в основе математического моделирования любых крючковых рыболовных систем в покоящейся жидкости.

Для симметричного каната, когда оси координат выбраны так, как показано на рис. 3, б, выполняются условия:  $z_A = z_B$ ,  $C_1 = C_3 = 0$ ,  $C_2 = p_x$  и формулы (5) принимают вид

$$\begin{aligned} x &= p_x \operatorname{arsh}(l/p_x); \\ z &= p_x \cdot \operatorname{ch}(x/p_x) - p_x; \\ l &= p_x \cdot \operatorname{sh}(x/p_x); \end{aligned} \quad (6)$$

$$b_k = 2x_B = 2p_x \operatorname{arsh}(l_k/2p_x);$$

$$T_{Ax} = T_O = |q_z|(l_k^2 - 4h^2)/8h; \quad T_{Az} = 0,5q_z l_k;$$

$$p_x = -T_{Ax} / q_z.$$

Здесь  $b_k$  – хорда каната;  $l_k$  – длина каната;  $h$  – стрелка прогиба (рис. 3).

Уравнения (6) являются математической моделью симметричного каната в покоящейся жидкости.

### Математическая модель рыболовного крючка

Рыболовный крючок служит для размещения наживки, захвата и удержания рыбы. В настоящее время используются плоские и пространственные крючки. Пространственный крючок работает на растяжение, изгиб и кручение. Так как напряжения от растяжения и кручения малы (они не превышают 2% напряжений изгиба), то диаметр проволоки крючка определяется из условия его прочности на изгиб.



Рис. 4. Силы, приложенные к рыболовному крючку:  
 $F_p$  – сила, с которой рыба действует на крючок;  $T_n$  – натяжение поводца;  $b_T$  – плечо натяжения поводца

Условие прочности рыболовного крючка заключается в том, что максимальное напряжение в наиболее нагруженном сечении крючка (сечение  $I-I$ , рис. 4) должно быть меньше допускаемого:

$$\sigma_x^{\max} = \frac{M_x^{\max}}{W_x} \leq [\sigma],$$

где  $M_x^{\max} = T_n b_T$  – максимальный изгибающий момент;  $T_n$  – натяжение поводца, при котором разрушается ротовая полость рыбы (определяется по формуле  $T_n = k_p G_p$ );  $k_p$  – коэффициент прочности ротовой полости рыбы, определяемый экспериментально (для трески  $k_p = 1,5-3,0$ ; меньшие значения – для более крупных рыб);  $G_p$  – вес рыбы в воздухе;  $W_x = I_x / y_{\max}$  – момент сопротивления поперечного сечения крючка;  $I_x = \int y^2 dS$  – момент инерции поперечного сечения крючка.

Для крючка, поперечное сечение которого – круг диаметром  $d$ , имеем

$$I_x = \frac{\pi d^4}{64}; \quad y_{\max} = \frac{d}{2};$$

$$W_x = \frac{I_x}{y_{\max}} = \frac{\pi d^3}{32} \approx 0,1d^3.$$

Крючки в основном выполняются из проволоки круглого сечения. В этом случае условие прочности крючка имеет вид

$$\sigma_x^{\max} = \frac{M_x^{\max}}{W_x} = \frac{T_n b_T}{0,1d^3} = \frac{10k_p G_p b_T}{d^3} \leq [\sigma].$$

Откуда находим диаметр проволоки рыболовного крючка:

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{10M_x^{\max}}{[\sigma]}} = \sqrt[3]{\frac{10T_n b_T}{[\sigma]}} = \sqrt[3]{\frac{10k_p G_p b_T}{[\sigma]}} \quad (7)$$

где  $[\sigma] = \frac{\sigma_T}{n_T}$  – допускаемое напряжение для материала крючка;  $\sigma_T$  – предел текучести материала крючка;  $n_T$  – коэффициент запаса прочности по текучести.

Максимальное натяжение крючкового поводца  $T_n^{\max}$ , при котором рыболовный крючок разгибается, определяется по формуле

$$\sigma_{\max} = \frac{M_x^{\max}}{W_x} = \frac{T_n^{\max} b_T}{0,1d^3} = \sigma_T \Rightarrow T_n^{\max} = \frac{0,1d^3 \sigma_T}{b_T}.$$

$$R_Y^H \cos \varphi_n + (R_Z^H + Q_Z^n + Q_Z^{H+KP}) \sin \varphi_n + R_{YV}^n = 0; \quad (11)$$

$$\left[ (R_{XV}^n + R_{XV}^H) \sin \alpha_n + R_{ZV}^n \cos \alpha_n \right] \cos \varphi_n + R_{YV}^n \cos \alpha_n \sin \varphi_n + (R_Z^H + Q_Z^n + Q_Z^{H+KP}) \cos \alpha_n = 0.$$

Разрывное усилие крючкового поводца:

$$T_b^n = n_b^n T_n^{\max} = \frac{0,1n_b^n d^3 \sigma_T}{b_T}. \quad (8)$$

Здесь  $n_b^n$  – коэффициент запаса поводца на разрыв ( $n_b^n = 3-5$ ). Диаметр нитки крючкового поводца выбирается по таблицам ГОСТ по его разрывному усилию  $T_b^n$ .

### Математическая модель системы «наживка – крючок – поводец»

Характеристики крючкового поводца: натяжение  $T_n$ , угол атаки  $\alpha_n$ , угол крена плоскости потока  $\varphi_n$ , необходимые для моделирования хребтин ярусов, определяются из условий равновесия системы «наживка – крючок – поводец» (рис. 5).

Векторное уравнение равновесия системы «наживка – крючок – поводец» имеет вид

$$\vec{T}_n = -(\vec{R}_H + \vec{R}_n + \vec{Q}_H + \vec{Q}_{KP} + \vec{Q}_n).$$

Проецируя это уравнение на оси земной системы координат, получим проекции натяжения поводца  $T_X^n, T_Y^n, T_Z^n$  на оси земной системы координат:

$$T_X^n = T_n \cos \alpha_n = -(R_X^n + R_X^H); \quad (9)$$

$$T_Y^n = T_n \sin \alpha_n \sin \varphi_n = -(R_Y^n + R_Y^H);$$

$$T_Z^n = T_n \sin \alpha_n \cos \varphi_n =$$

$$= -(R_Z^n + R_Z^H + Q_Z^n + Q_Z^H + Q_Z^{KP}),$$

где  $T_n$ ,  $\alpha_n$  – натяжение и угол атаки крючкового поводца;  $\varphi_n$  – угол крена плоскости потока поводца;  $Q_Z^n, Q_Z^H, Q_Z^{KP}$  – веса в воде поводца, наживки и крючка соответственно;  $R_X^n, R_Y^n, R_Z^n$  – проекции гидродинамической силы поводца на оси земной системы координат, определяемые по формулам

$$R_X^n = R_{XV}^n; \quad R_Y^n = R_{YV}^n \cos \varphi_n - R_{ZV}^n \sin \varphi_n;$$

$$R_Z^n = R_{YV}^n \sin \varphi_n + R_{ZV}^n \cos \varphi_n. \quad (10)$$

Здесь

$$R_{XV}^n = C_{XV}^n (0,5\rho V^2) d_n l_n, \quad (x_V, y_V, z_V).$$

Из уравнений (9) и (10) следует:

Система (10) – это система линейных алгебраических уравнений относительно  $\sin\varphi_n$  и  $\cos\varphi_n$ . По формулам Крамера находим

$$\sin\varphi_n = \frac{\Delta_{\sin\varphi_n}}{\Delta}; \quad \cos\varphi_n = \frac{\Delta_{\cos\varphi_n}}{\Delta}.$$

Угол атаки поводца  $\alpha_n$  определяется из соотношения

$$\begin{aligned} \sin^2\varphi_n + \cos^2\varphi_n = 1 &\Rightarrow \Delta_{\sin\varphi_n}^2 + \Delta_{\cos\varphi_n}^2 = \Delta^2 \Rightarrow \\ &\Rightarrow \left\{ -R_Y^H (R_Z^H + Q_Z^n + Q_Z^{H+KP}) + R_{YV}^n \left[ (R_{XV}^n + R_{XV}^H) \operatorname{tg}\alpha_n + R_{ZV}^n \right] \right\}^2 + \\ &\quad + \left\{ (R_{YV}^n)^2 - (R_Z^H + Q_Z^n + Q_Z^{H+KP})^2 \right\}^2 - \\ &\quad - \left\{ R_Y^H R_{YV}^n - (R_Z^H + Q_Z^n + Q_Z^{H+KP}) \left[ (R_{XV}^n + R_{XV}^H) \operatorname{tg}\alpha_n + R_{ZV}^n \right] \right\}^2 = 0. \end{aligned} \quad (12)$$

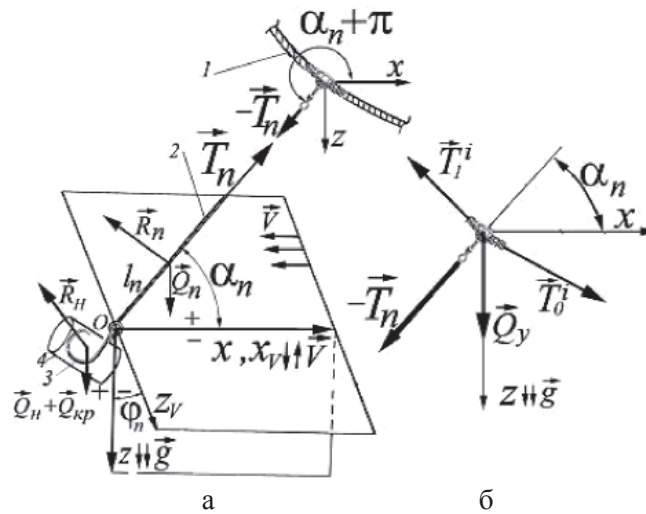


Рис. 5. Система «наживка – крючок – поводец»: 1 – хребтина; 2 – крючковый поводец; 3 – рыболовный крючок; 4 – наживка (а); б – узел крепления крючкового поводца к хребтине яруса

Угол крена плоскости потока поводца  $\varphi_n$  и его натяжение  $T_n$  определяются из соотношений

$$\operatorname{tg}\varphi_n = \frac{\Delta_{\sin\varphi_n}}{\Delta_{\cos\varphi_n}}; \quad T_n = \sqrt{T_{nx}^2 + T_{ny}^2 + T_{nz}^2}. \quad (13)$$

Формулы (11)–(13) получены при допущении, что поводец является прямолинейным.

### Математическая модель хребтины яруса с учетом течений

Система (2) лежит в основе моделирования хребтин ярусов с учётом течений. При разработке математической модели хребтины яруса необходимо учитывать действие на неё крючковых поводцов. Его можно учитывать двояко:

- во-первых, сосредоточенными силами (натяжениями поводцов  $T_n$ ), приложенными в точках крепления поводцов к хребтине;

- во-вторых, путём равномерного распределения натяжения поводцов по длине хребтины.

**В первой методике** хребтина на  $i$ -м участке рассматривается состоящей из  $(n_{kp}^i + 1)$  отрезков, на которые она делится точками крепления к ней крючковых поводцов. Здесь  $n_{kp}^i$  – количество крючков на  $i$ -м участке. В этом случае каждый отрезок хребтины нагружен весом в воде и гидродинамическими силами. Характеристики хребтины на  $i$ -м участке определяются путем численного решения задачи Коши для уравнений равновесия хребтины в потоке (2) на каждом из  $(n_{kp}^i + 1)$  ее отрезков. Начальные данные  $T_0, \alpha_0, \varphi_0$  для решения задачи Коши определяются из условий равновесия узлов крепления поводцов к хребтине (рис. 5, б):

$$\vec{T}_0^i + \vec{T}_1^i - \vec{T}_n + \vec{Q}_y = \vec{0} \Rightarrow \vec{T}_0^i = \vec{T}_n - \vec{T}_1^i - \vec{Q}_y.$$

Проецируя это уравнение на оси земной системы координат, получим

$$T_0^i \cos \alpha_0^i = T_n \cos \alpha_n - T_1^i \cos \alpha_1^i; \quad (14)$$

$$T_0^i \sin \alpha_0^i \sin \varphi_0^i = T_n \sin \alpha_n \sin \varphi_n - T_1^i \sin \alpha_1^i \sin \varphi_1^i;$$

$$T_0^i \sin \alpha_0^i \cos \varphi_0^i = T_n \sin \alpha_n \cos \varphi_n - T_1^i \sin \alpha_1^i \cos \varphi_1^i + Q_z^y.$$

Здесь  $T_1^i, T_0^i$  – натяжения хребтины до и после  $i$ -го узла крепления поводца к хребтине (рис. 5, б);  $Q_z^y$  – вес в воде узла соединения поводца с хребтиной;  $\alpha_1^i, \varphi_1^i; \alpha_0^i, \varphi_0^i$  – углы атаки хребтины и крена плоскости потока до узла и после него.

Для расчета характеристик хребтины на  $i$ -м участке необходимо определять  $(n_{kp}^i + 1)$  раз начальные данные, а именно: в начале

участка (точке  $A_i$ ) и в точках крепления поводцов к хребтине  $K_{i1}, K_{i2}, K_{i3}, \dots$  (рис. 6).

Первая методика удобна при расчёте ярусов для лова тунцов, когда на участке длиной 300 м размещается 5–6 поводцов с крючками, расстояние между которыми 30–60 м. Но она сложна при расчёте придонных ярусов, когда на участке яруса размещается много крючков (250 и более) при расстоянии между крючками 1,0–1,5 м. В этом случае расчёты удобнее вести по второй методике, изложенной ниже.

**Во второй методике** натяжения поводцов равномерно распределяются по длине хребтины. В этом случае начальные данные для расчета хребтины на  $i$ -м участке определяются только один раз, а именно в начале участка – точке  $A_i$ .

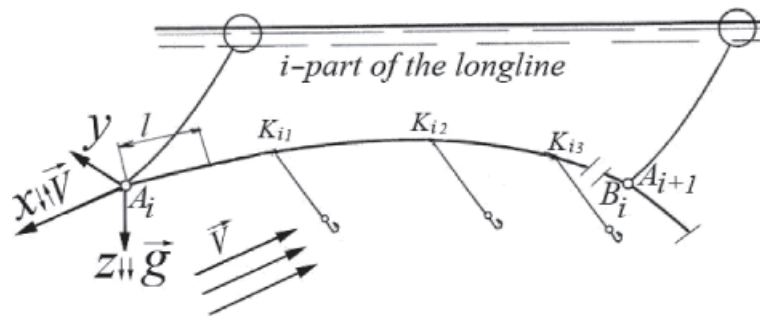


Рис. 6.  $i$ -й участок яруса при наличии течений

Математическая модель хребтины с учетом равномерно распределенных по длине хребтины сил от натяжения поводцов имеет вид

$$\dot{T}_{xp} = q_z^{xp+y} \sin \alpha_{xp} \cos \varphi_{xp} - (r_{xv} + t_{xv}^n) \cos \alpha_{xp} + (r_{zv} + t_{zv}^n) \sin \alpha_{xp};$$

$$\dot{\alpha}_{xp} = \frac{q_z^{xp+y} \cos \alpha_{xp} \cos \varphi_{xp} + (r_{xv} + t_{xv}^n) \sin \alpha_{xp} + (r_{zv} + t_{zv}^n) \cos \alpha_{xp}}{T_{xp}};$$

$$\dot{\varphi}_{xp} = \frac{-(q_z^{xp+y} \sin \varphi_{xp} + r_{yv} + t_{yv}^n)}{T_{xp} \sin \alpha_{xp}}; \quad (15)$$

$$\dot{x} = \cos \alpha_{xp}; \quad \dot{y} = \sin \alpha_{xp} \sin \varphi_{xp}; \quad \dot{z} = -\sin \alpha_{xp} \cos \varphi_{xp}; \quad q_z^{xp+y} = k_w^{xp} m_{xp} g + k_w^y n_{kp}^S M_y g / l_s;$$

$$r_{xv} = C_{xv}^{xp}(\alpha_{xp}) \cdot (0,5\rho V^2) d_{xp}, \quad (x_v, y_v, z_v); \quad t_{xv}^n = t_x^n; \quad t_{yv}^n = t_y^n \cos \varphi_{xp} + t_z^n \sin \varphi_{xp};$$

$$t_{zv}^n = -t_y^n \sin \varphi_{xp} + t_z^n \cos \varphi_{xp}; \quad t_x^n = \frac{n_{kp}^S (R_{xv}^n + R_x^h)}{l_s}; \quad t_y^n = \frac{n_{kp}^S (R_{yv}^n \cos \varphi_n - R_{zv}^n \sin \varphi_n + R_y^h)}{l_s};$$

$$t_z^n = \frac{n_{kp}^S (R_{yv}^n \sin \varphi_n + R_{zv}^n \cos \varphi_n + R_z^h + Q_z^n + Q_z^{h+kp})}{l_s};$$

$$Q_z^n = k_w^n m_n l_n g; \quad Q_z^{h+kp} = k_w^h M_h g + k_w^{kp} M_{kp} g; \quad R_{xv}^n = C_{xv}^n(\alpha_n) \cdot (0,5\rho V^2) d_n l_n, \quad (x_v, y_v, z_v);$$

$$C_{xv}^{xp} = -(c_{11} \sin^2 \alpha_{xp} + c_{12} \sin^4 \alpha_{xp} + c_{13} \cos^2 \alpha_{xp});$$



$$C_{YV}^{xp} = \pm (c_{21} \sin \alpha_{xp} \cos \alpha_{xp} + c_{22} \sin^3 \alpha_{xp} \cos \alpha_{xp});$$

$$C_{ZV}^{xp} = - (c_{31} \sin \alpha_{xp} \cos \alpha_{xp} + c_{32} \sin^3 \alpha_{xp} \cos \alpha_{xp}),$$

(xp, n),

где  $q_z^{xp+y}$  – проекция на ось z веса в воде 1 м хребтины с узлами крепления к ней крючковых поводцов;  $M_y$  – масса узла крепления поводца к хребтине;  $d_{xp}, d_n$  – диаметры хребтины и поводца;  $l_n$  – длина поводца;  $t_x^n, t_y^n, t_z^n$  – проекции на оси земной системы координат натяжений крючковых поводцов, приходящихся на единицу длины хребтины;  $R_x^n, R_x^{n+kp}, (x, y, z)$  – проекции гидродинамических сил поводца и наживки с крючком;  $\alpha_n$  – угол атаки поводца;  $T_{xp}, \alpha_{xp}, \varphi_{xp}$  – натяжение, угол атаки хребтины и угол крена плоскости потока хребтины в текущей точке;  $r_{xV}, r_{yV}, r_{zV}$  – проекции гидродинамических сил, приходящихся на 1 м хребтины, на оси поточной системы координат;  $Q_z^n, Q_z^{n+kp}$  – веса в воде поводца и наживки с крючком соответственно;  $m_{xp}, m_n$  – линейные плотности хребтины и поводца.

Для успешного лова гидробионтов необходимо обеспечить нахождение всех крючков в слое рыбы. Интегрируя дифференциальные уравнения

$$\dot{x} = -\cos \alpha_n; \quad \dot{y} = -\sin \alpha_n \sin \varphi_n;$$

$$\dot{z} = \sin \alpha_n \cos \varphi_n,$$

получим координаты крючков в системе  $Axyz$  (рис. 7):

$$x_{ij}^{kp} = x_{ij} - \cos \alpha_n l_n; \quad y_{ij}^{kp} = y_{ij} - \sin \alpha_n \sin \varphi_n l_n;$$

$$z_{ij}^{kp} = z_{ij} + \sin \alpha_n \cos \varphi_n l_n,$$

где  $x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}$  – координаты точки крепления  $j$ -го поводца к хребтине на  $i$ -м участке яруса;  $x_{ij}^{kp}, y_{ij}^{kp}, z_{ij}^{kp}$  – координаты крючков;  $l_n$  – длина крючкового поводца (рис. 7).

### Математическая модель якоря

Якоря служат для обеспечения неподвижности яруса, заданной стрелки прогиба хребтины и увеличения скорости погружения ярусного порядка.

На промысле используются якоря без подъякорников и с подъякорниками в форме грузов, рис. 8. В общем случае натяжение якорного линия  $\vec{T}_A$  в точке  $A$  его крепления к якорю имеет горизонтальную  $\vec{T}_{Ax}$  и вертикальную  $\vec{T}_{Az}$  составляющие. Первая из них уравнивается держащей силой якоря  $\vec{F}_я$ , вторая – весом в воде якоря и/или подъякорника.

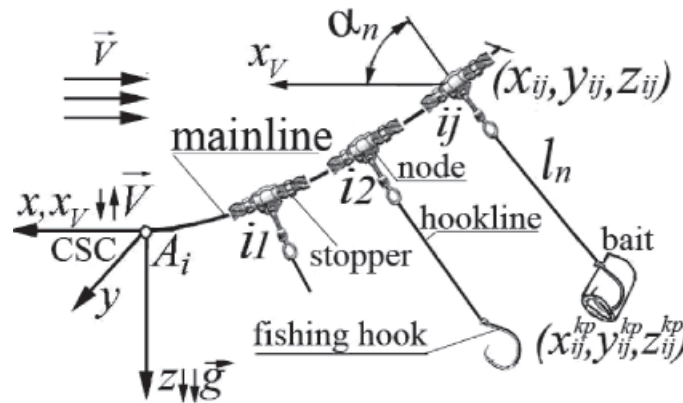


Рис. 7. К определению координат  $j$ -го рыболовного крючка на  $i$ -м участке яруса

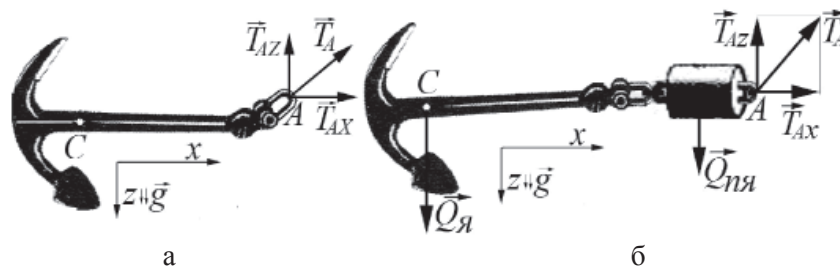


Рис. 8. Якоря: а – без подъякорника; б – с подъякорником в форме цилиндра

Максимальная горизонтальная сила  $F_{я}^{\max}$  которую способен удерживать якорь (держущая сила якоря), определяется по формуле

$$F_{я}^{\max} = k_{я} \cdot F_n$$

где  $k_{я}$  – коэффициент держущей силы якоря (зависит от типа якоря и грунта);  $F_n$  – сила давления якоря на грунт, определяемая по формулам

$F_n = Q_{я} + T_{AZ} = k_w^n M_{я} g + T_{AZ}$  – для якоря без подъякорника;

$F_n = Q_{я} + Q_{пн} + T_{AZ} = k_w^n M_{я} g + k_w^{пн} M_{пн} g + T_{AZ}$  – для якоря с подъякорником.

Здесь  $M_{я}$ ,  $M_{пн}$  – массы якоря и подъякорника.

Масса якоря определяется по формулам: якорь без подъякорника (рис. 8, а):

$$M_{я} = \frac{T_{AX} - k_{я} T_{AZ}}{k_{я} k_w^n g}; \quad (16)$$

якорь с подъякорником (рис. 8, б):

$$M_{я} = \frac{T_{AX} - f(Q_{пн} + T_{AZ})}{k_{я} k_w^n g}; \quad (17)$$

где  $f$  – коэффициент трения подъякорника о грунт;  $Q_{пн}$  – вес подъякорника в воде;  $T_{AX}$ ,  $T_{AZ}$  – проекции на оси  $x$  и  $z$  натяжения якорного линия в точке его крепления к якорю (причем  $T_{AZ} \leq 0$ , так как ось  $z$  направлена по отвесу вниз, т.е.  $z \downarrow \downarrow \vec{g}$ );  $k_w^n$ ,  $k_w^{пн}$  – коэффициенты веса якоря и подъякорника в воде ( $k_w = 0,87$  – сталь,  $k_w = 0,67$  – бетон).

Сила  $T_{AX}$  должна обеспечивать заданную стрелку прогиба хребтины яруса. Она определяется по формулам:

• для пелагического яруса (рис. 9, а):

$$T_{AX} = T_o = |q_z^\Sigma| (l_s^2 - 4h_s^2) / 8h_s; \quad (18)$$

• для придонного яруса (рис. 9, б):

$$T_{AX} = 0,5 |q_z^\Sigma| \sqrt{[(2p_z^\Sigma - l_s)^2 - h_s^2]} (l_s^2 - h_s^2) / h_s, \quad (19)$$

где  $q_z^\Sigma = Q_z^S / l_s$  – вес в воде яруса, приходящийся на единицу его длины;  $Q_z^S = Q_z^{xp} + n_{kp}^S (Q_z^y + Q_z^{kp} + Q_z^n + Q_z^h)$  – вес в воде одной секции яруса с наживкой;  $Q_z^{xp}$ ,  $Q_z^y$ ,  $Q_z^{kp}$ ,  $Q_z^n$ ,  $Q_z^h$  – вес в воде хребтины, узла крепления поводца к хребтине, крючка, поводца, наживки;  $n_{kp}^S$  – количество рыболовных крючков в секции яруса;  $l_s$  – длина одной секции яруса;  $p_z^\Sigma = T_{AZ}^{xp} / q_z^\Sigma$  – параметр яруса;  $h_s$  – стрелка прогиба хребтины;  $T_o$  – натяжения симметричной хребтины в нижней точке  $O$  (рис. 9, а).

Вертикальная проекция  $T_{AZ}$  натяжения линия в точке  $A$  определяется по формуле (рис. 9, а):

$$T_{AZ} = 0,5 q_z^n \left[ l_n \pm z_B \sqrt{1 + (2p_x^n)^2 / (l_n^2 - z_B^2)} \right]; \quad (20)$$

где  $l_n$  – длина линия;  $z_B$  – аппликата точки  $B$  – конца якорного линия ( $z_B < 0$ );  $q_z^n$ ,  $p_x^n$  – вес в воде 1 м линия и параметр линия, определяемые по формулам

$$q_z^n = k_w^n m_n g; \quad p_x^n = \frac{-T_{AX}}{q_z^n};$$

Здесь  $m_n$  – линейная плотность линия;  $k_w^n$  – коэффициент веса в воде линия ( $k_w^n = 0,126$  – полиэстер,  $k_w^n = 0,1$  – полиамид,  $k_w^n = -0,1$  – дэнлайн,  $k_w^n = -0,057$  – дайнекс).

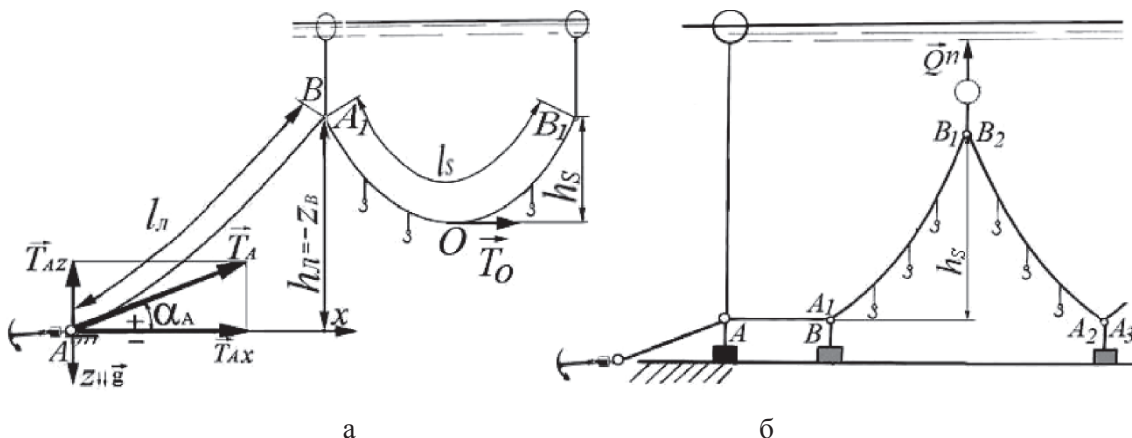


Рис. 9. Два типа крючковых ярусов: а – пелагический; б – придонный

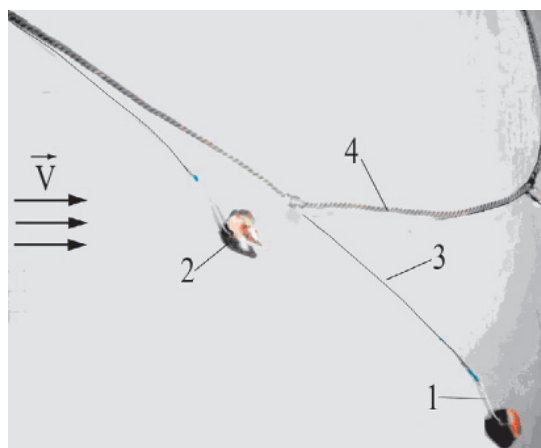


Рис. 10. Фото хребтины яруса в аэродинамической трубе при скорости воздуха 18 м/с: 1 – рыболовный крючок; 2 – наживка; 3 – крючковый поводец; 4 – хребтина

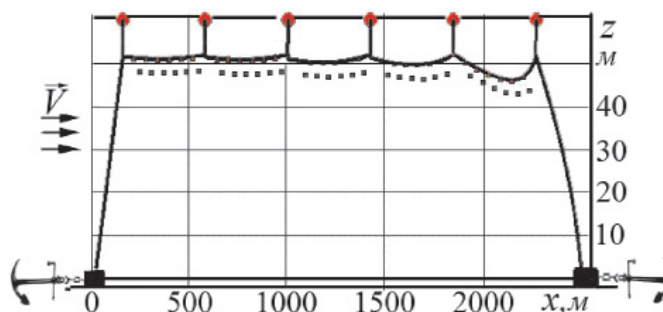


Рис. 11. Общий вид стационарного пелагического тунцеловного яруса, полученного компьютерным моделированием

В формуле (20) перед радикалом берется знак (+), если  $q_z^n > 0$ , т.е. когда якорный лить тяжелее воды, и знак (–) – в противном случае.

Разработаны адекватные математические модели (2)–(20) элементов крючковых орудий рыболовства, позволяющие выполнять их математическое моделирование. Адекватность этих моделей подтверждена их испытаниями в гидродинамических лотках и аэродинамических трубах (рис. 10).

Математические модели (2)–(20) положены в основу программного комплекса «Моделирование ярусных порядков и их элементов с учётом течений CM-LongLine». Комплекс состоит из набора программ. Эти программы могут работать как автономно, моделируя отдельные элементы яруса, так и системно, моделируя весь ярусный порядок. Результаты компьютерного моделирования стационарного пелагического яруса приведены на рис. 11.

### Выводы

Получен общий интеграл (4) дифференциальных уравнений (3) равновесия гибких канатов в покоящейся жидкости, являющийся обобщением работы [10] на случай, когда канат (хребтина крючкового яруса) легче воды. Он позволяет выполнять математическое моделирование любых крючковых рыболовных систем в покоящейся жидкости.

Для дрейфующих крючковых ярусов и стационарных ярусов при наличии течений разработаны математические модели их элементов: рыболовного крючка (7), крючкового поводца (8), системы «наживка – крючок – поводец» (9)–(13), узла крепления поводца к хребтине (14); гибкого каната в потоке (2); хребтины яруса (15), якоря (16)–(20). На основе этих математических моделей на языке программирования Borland Delphi разработан программный комплекс CM-LongLine (Computer Modeling LongLine), позволяющий выполнять компьютерное моделирование всех типов ярусов при наличии течений.

**Список литературы**

1. Аппель П. Теоретическая механика. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. литературы, 1960. – т. 1. – 516 с., т. 2. – 488 с.
2. Габрюк В.И., Кулагин В.Д. Механика орудий рыболовства и АРМ промысловика. – М.: Колос, 2000. – 416 с.
3. Габрюк В.И., Чернецов В.В., Бойцов А.Н. Основы моделирования рыболовных систем. – Владивосток: Дальрыбвтуз, 2008. – 560 с.
4. Габрюк В.И. Методы проектирования и моделирования рыболовных орудий. – Владивосток: Дальрыбвтуз, 2014. – 432 с.
5. Зарубин В.С. Математическое моделирование в технике. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 495 с.
6. Киттел Ч., Найт В., Рудерман М. Механика. Берклевский курс физики (Том 1). – М.: Наука, 1983. – 448 с.
7. Кокорин Н.В. Лов рыбы ярусами. – М.: ВНИРО, 1994. – 421 с.
8. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. – М.: Физматгиз, 2002. – 320 с.
9. Седов Л.И. Механика сплошной среды. – М.: Наука, 1973. т.1, 536 с. – т.2, 584 с.
10. Bernoulli J. Solutio problematis funicularii. – Acta eruditorum, Lipsiae, 1691. June. P. 262–276.

**References**

1. Appel P. Teoreticheskaja mehanika. M.: Gos. izd-vo fiz.-mat. literatury, 1960. t. 1. 516 s., t. 2. 488 p.
2. Gabryuk V.I., Kulagin V.D. Mehanika orudij rybolovstva i ARM promyslovika. M.: Kolos, 2000. 416 p.

3. Gabryuk V.I., Chernecov V.V., Bojcov A.N. Osnovy modelirovanija rybolovnyh si-stem. Vladivostok: Dal'rybvvtuz, 2008. 560 p.

4. Gabryuk V.I. Metody proektirovanija i modelirovanija rybolovnyh orudij. Vladi-vostok: Dal'rybvvtuz, 2014. 432 p.

5. Zarubin V.S. Matematicheskoe modelirovanie v tehnikе. M.: Izd-vo MGTU im. N.Je. Baumana, 2010. 495 p.

6. Kittel Ch., Najt V., Ruderman M. Mehanika. Berkleevskij kurs fiziki (Tom 1). M.: Nauka, 1983. 448 p.

7. Kokorin N.V. Lov ryby jarusami. M.: VNIRO, 1994. 421 p.

8. Samarskij A.A., Mihajlov A.P. Matematicheskoe modelirovanie: Idei. Metody. Primery. M.: Fizmatgiz, 2002. 320 p.

9. Sedov L.I. Mehanika sploshnoj sredy. M.: Nauka, 1973. t.1, 536 p. t.2, 584 p.

10. Bernoulli J. Solutio problematis funicularii. Acta eruditorum, Lipsiae, 1691. June. pp. 262–276.

**Рецензенты:**

Азовцев А.И., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Теория и устройство судов», МГУ им. адм. Г.И. Невельского, г. Владивосток;

Друзь И.Б., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая механика и сопротивление материалов», МГУ им. адм. Г.И. Невельского, г. Владивосток.