УДК 639.2.081.001.4

Л.А. Габрюк

РАСЧЕТНЫЕ СХЕМЫ КРЮЧКОВЫХ ЯРУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Дальневосточный федеральный университет,
690600, г. Владивосток, ул. Суханова, 8

Приведены расчетные схемы и математические модели горизонтальных ярусов. Впервые приведена математическая модель дрейфующего пелагического яруса. Даны рекомендации по выбору схем расчета.

***Ключевые слова**: канат, гибкая нить, стержень, расчетная схема, ярусная конструкция, хребтина яруса, моделирование, дрейфующий ярус.*

L.A. Gabruk

SETTLING SCHEMES OF HOOK LOGLINE DESIGNS

In article settling schemes and mathematical models of horizontal longlines are resulted. For the first time the mathematical model drifting palagic of logline is resulted. Recommendations for choice calculation schemes are given.

***Key words:** a rope, a flexible thread, a core, the settling scheme, a design of logline, a manline of logline, the modelling, a drifting of logline.*

Введение

При выборе расчетных схем и обосновании математических моделей инженерных конструкций выделяются такие элементы, как стержни, канаты, оболочки, пластины, балки. Гибкий канат является самой простым элементом ярусных конструкций (рис. 1, 2). Современные ярусные конструкции нашли применение в крючковых рыболовных системах, висячих мостах, вантовых системах, линиях электропередач, канатных дорогах, стрелочных кранах, конструкциях подводных плантаций для выращивании марикультуры, в глубинных гидрографических устройствах, различных судовых тросовых системах для удержания объектов на плаву, разнообразных антенных сооружениях. Несущим элементом ярусных конструкций является пространственно-криволинейный канат.

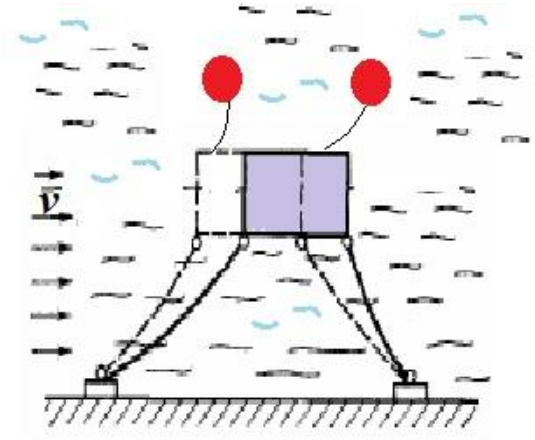


Рис. 1. Ярусная система удержания подводных объектов
Fig. 1. System of longline of deduction of underwater objects

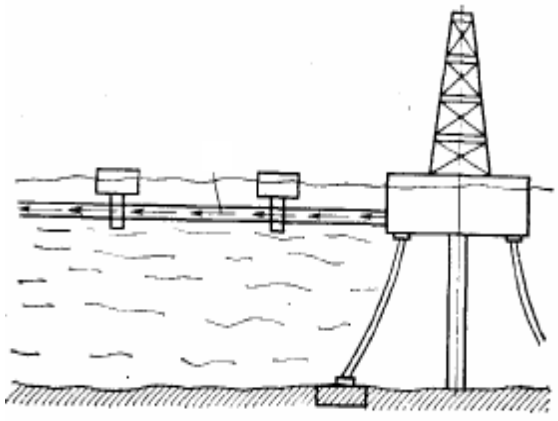


Рис. 2. Ярусная система перекачки жидкости
Fig. 2. System of longline of swapping of a liquid

Материалы и методы

Много теоретически интересных и практически важных задач статики и динамики канатов ярусов возникает при исследовании взаимодействия каната с потоком воздуха или

жидкости. Учет сил взаимодействия с внешним потоком приводит к более сложным задачам по сравнению с традиционными [1]. Основная трудность при решении этих задач заключается в сложности получить информацию о силах, действующих на находящихся в потоке канатов. Это вызвано тем, что канаты, находящиеся в потоке, сильно отклоняются от первоначальной равновесной формы. Кроме того, на угол между касательной к осевой линии каната и вектором скорости потока влияют гидродинамические силы.

Разработка ярусных систем, удовлетворяющих современным требованиям, невозможна без использования математических моделей этих систем, учитывающих пространственную сложность, геометрическую нелинейность, материал и специфику их эксплуатации. Так как экспериментальные исследования ярусных систем в условиях моря часто невозможны, поэтому аналитические методы их исследования являются наиболее эффективными и экономически целесообразными. Сегодня имеется большой опыт по описанию моделей гибких канатов. Современные математические модели каната, в основном – это решение задачи на равновесие каната в воздухе в виде уравнения цепной линии (интегралов Лейбница-Бернулли-Гюйгенса, 1691 г.).

Исследование реального объекта следует начинать с выбора расчетной схемы [2]. Приступая к расчету проектируемой конструкции, обоснованию ее расчетной схемы и выбору соответствующей ей математической модели, следует провести формализацию объекта и отбросить несущественные факторы, которые не оказывают особого влияния на суть задачи.

Разработке математических моделей ярусных рыболовных систем посвящены работы [3-11]. Элементами ярусов являются канаты, буи, грузы, якоря.

Результаты и их обсуждение

Векторное уравнение равновесия гибкого каната [3]

$$d(T\vec{\tau})/dl + \vec{G} + \vec{A} + \vec{r} = d(T\vec{\tau})/dl + \vec{q} + \vec{r} = \vec{0} \qquad (1)$$

является основополагающим для моделирования каната в потоке. Здесь l – дуговая координата текущей точки каната; T – натяжение нити в текущей точке l; $\vec{\tau}$ – орт-касательная к оси каната, направленный в сторону роста дуговых координат; $\vec{r}$ – гидродинамическая сила, приходящаяся на 1 м каната; $\vec{q} = \vec{G} + \vec{A}$ – вес 1 м каната в воде; $\vec{G}$ – вес 1 м каната в воздухе; $\vec{A}$ – архимедова выталкивающая сила.

Уравнение (1) получено при следующих допущениях:

- поперечные сечения каната не деформируются;
- размеры сечения каната считаются малыми по сравнению с длиной каната;
- длина каната не изменяется под нагрузкой;
- в поперечных сечениях каната не возникает поперечных сил, изгибающих и крутящихся моментов;
- различные статически эквивалентные нагрузки вызывают в канате одно и то же натяжение (принцип Сен-Венана) [1].

В [8] получена общая трехмерная математическая модель канатов, устанавливаемых под углом γ к течению (потоку).

Система дифференциальных уравнений для нахождения формы и натяжения хребтины яруса в потоке, когда она располагается под углом к течению и угол γ меняется, имеет вид

$$
\begin{aligned}
\dot{T} &= q_Z \sin\alpha\cos\varphi - r_{XV}\cos\alpha + r_{ZV}\sin\alpha;\\
\dot{\alpha} &= (q_Z \cos\alpha\cos\varphi + r_{XV}\sin\alpha + r_{ZV}\cos\alpha - T\sin\varphi\dot{\gamma})/T;\\
\dot{\varphi} &= -(q_Z \sin\varphi + r_{YV} + T\cos\alpha\cos\varphi\dot{\gamma})/T\sin\alpha;\\
\dot{x} &= (\cos\alpha\cos\gamma - \sin\alpha\cdot\sin\varphi\sin\gamma);\\
\dot{y} &= (\cos\alpha\sin\gamma + \sin\alpha\cdot\cos\gamma\sin\varphi);\\
\dot{z} &= -\sin\alpha\cos\varphi;\\
\dot{\gamma} &= \frac{d\gamma}{dl} = \frac{d\gamma}{dz}\frac{dz}{dl} = \frac{d\gamma}{dz}\dot{z} = -\frac{d\gamma}{dz}\sin\alpha\cos\varphi,\\
r_{XV} &= C_{XV}(0{,}5\rho V^2)d^{\,xp},\ \ (x_V, y_V, z_V),
\end{aligned}
\tag{2}
$$

где $\vec{T}$ – натяжение каната; α – угол атаки каната; φ – угол крена каната; γ – угол между осью x и вектором скорости течения $\vec{V}$; $\dot{\gamma}$ – скорость изменения угла γ; r_{XV}, r_{YV}, r_{ZV} – проекции гидродинамической силы каната на оси поточной системы координат, приходящиеся на единицу его длины; x, y, z – координаты; $C_{XV}, C_{YV} C_{ZV}$ – гидродинамические коэффициенты сил сопротивления, подъемной (заглубляющей) и боковой зависят от материала каната, угла атаки, числа Рейнольдса, относительного удлинения каната.

Если скорость течения постоянна $\vec{V} = \vec{c}const$, т.е. не меняется по глубине *h*, то $\gamma = const$, $\dot{\gamma} = 0$, в этом случае система (2) принимает вид

$$
\begin{aligned}
\dot{T} &= q_Z \sin\alpha\cos\varphi - r_{XV}\cos\alpha + r_{ZV}\sin\alpha;\\
\dot{\alpha} &= (q_Z \cos\alpha\cos\varphi + r_{XV}\sin\alpha + r_{ZV}\cos\alpha)/T;\\
\dot{\varphi} &= -(q_Z \sin\varphi + r_{YV})/T\sin\alpha;\\
\dot{x} &= (\cos\alpha\cos\gamma - \sin\alpha\cdot\sin\varphi\sin\gamma);\\
\dot{y} &= (\cos\alpha\sin\gamma + \sin\alpha\cdot\cos\gamma\sin\varphi);\\
\dot{z} &= -\sin\alpha\cos\varphi.
\end{aligned}
\tag{3}
$$

Если вектор скорости течения $\vec{v}$ находится в плоскости горизонта и канат выметывается параллельно течению, то ось *x* направляют по оси x_V. В этом случае $\gamma = 0$ и система уравнений (3) принимает вид [3]

$$
\begin{aligned}
\dot{T} &= q_Z \sin\alpha\cos\varphi - r_{XV}\cos\alpha + r_{ZV}\sin\alpha;\\
\dot{\alpha} &= (q_Z \cos\alpha\cos\varphi + r_{XV}\sin\alpha + r_{ZV}\cos\alpha)/T;\\
\dot{\varphi} &= -(q_Z \sin\varphi + r_{YV})/T\sin\alpha;\\
\dot{x} &= \cos\alpha;\\
\dot{y} &= \sin\alpha\cdot\sin\varphi;\\
\dot{z} &= -\sin\alpha\cos\varphi.
\end{aligned}
\tag{4}
$$

На рис. 3 рассматривается случай, когда вектор скорости течения $\vec{v}$ находится в плоскости горизонта. Здесь ось *x* направлена по хорде хребтины и образует угол γ с осью x_V. Ось x_V направлена против потока; ось $z_V \perp \vec{v}$ и лежит в плоскости потока, т.е. ($z_v \in (\vec{\tau v})$).

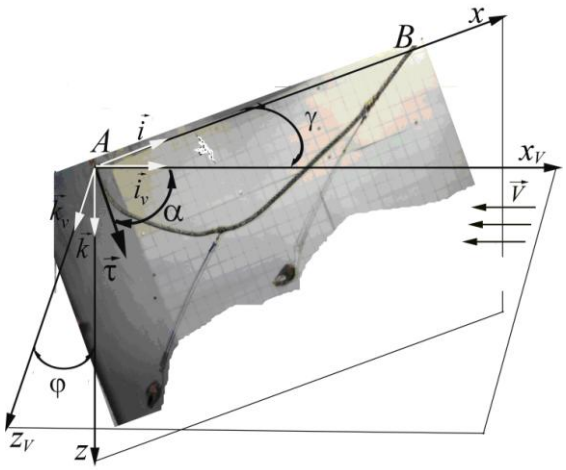


Рис. 3. Хребтина яруса,
установленная под углом к потоку
Fig. 3. A mainline of longline installed
under a corner to a stream

В этом случае положение поточной системы (ПСК) относительно земной (ЗСК) определяется двумя углами γ, φ .Здесь γ – угол между осями x и x_V; φ – угол между осями z и z_V. Угол φ называется углом крена плоскости потока каната.

Вектор $\vec{\tau}$ лежит в плоскости потока $x_V z_V$. Его ориентация относительно ПСК однозначно определяется углом α между касательной к оси каната и осью x_V.

Из равенства

$$\vec{r} = (r_{XV}, r_{YV}, r_{ZV}) \begin{pmatrix} \vec{i}_V \\ \vec{j}_V \\ \vec{k}_V \end{pmatrix} = (r_X, r_Y, r_Z) \begin{pmatrix} \cos\gamma & -\cos\varphi\sin\gamma; & \sin\varphi\sin\gamma; \\ \sin\gamma; & \cos\gamma\cos\varphi; & -\cos\gamma\sin\varphi \\ 0 & \sin\varphi & \cos\varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{i}_V \\ \vec{j}_V \\ \vec{k}_V \end{pmatrix}$$

определяется связь между проекциями гидродинамической силы в ПСК и ЗСК:

$$r_{XV} = r_X \cos\gamma + r_Y \sin\gamma;$$

$$r_{YV} = -r_X \cos\varphi \sin\gamma + r_Y \cos\gamma\cos\varphi + r_Z \sin\varphi ;$$

$$r_{ZV} = r_X \sin\varphi \sin\gamma - r_Y \cos\gamma\sin\varphi + r_Z \cos\varphi .$$

Системы дифференциальных уравнений (2-4) – это математическая модель каната в потоке.

Конструкция дрейфующего яруса приведена на рис. 4. Канатными элементами яруса являются хребтина, буйлини, якорный линь, вожак, крючковые поводцы. На рис. 4 хребтина задана отрезками A_1B_1, A_2B_2, A_3B_3; буйлини – отрезками A_1C_1, A_2C_2, A_3C_3; AO – вожак. Несущей конструкцией яруса является хребтина.

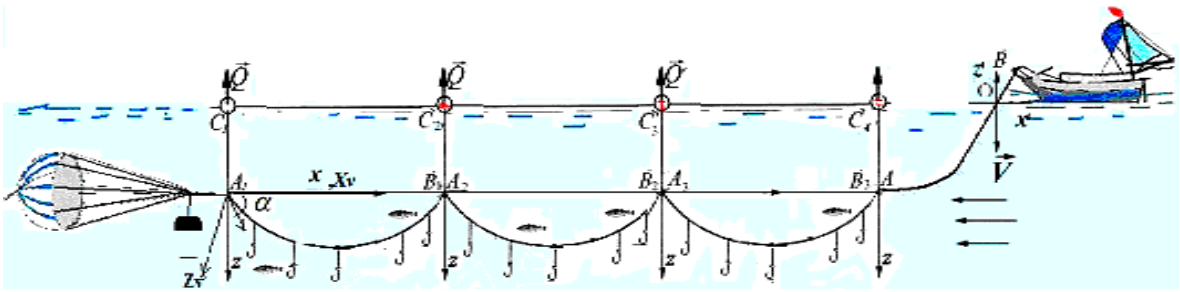


Рис. 4. Дрейфующий пелагический ярус
Fig. 4. Drifting pelagig a logline

При расчете хребтины первого участка яруса необходимо выполнить условие стыковки трех элементов яруса: якорного линя (линя плавучего якоря), буйлиня и первого участка хребтины яруса (рис. 5), векторное уравнение равновесия узла *B* имеет вид [6]

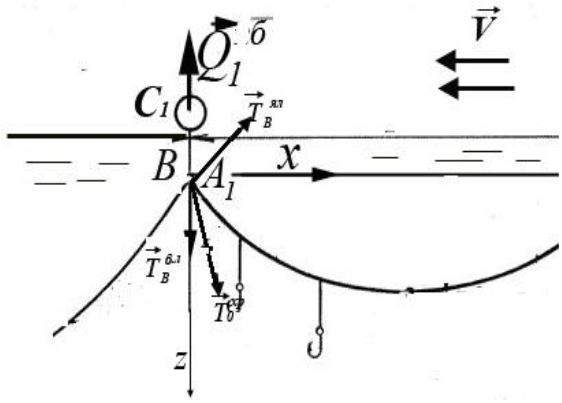


Рис. 5. Силы, действующие на узел *B*
Fig. 5. The forces acting on unit *B*

$$\vec{T}_0^{\,xp} + \vec{T}_B^{\,ял} + \vec{T}_B^{\,бл} = \vec{0}.$$

Проецируя это уравнение на оси ЗСК *x*, *y*, *z*, получим:

$$T_{0X}^{xp} = T_0^{xp}\cos\alpha_0^{xp} =$$
$$= T_B^{ял}\cos\alpha_B^{ял} + T_B^{бл}\cos\alpha_B^{бл};$$

$$T_{0Y}^{xp} = T_0\sin\alpha_0^{xp}\sin\varphi_0^{xp} = T_B^{л}\sin\alpha_B^{ял}\sin\varphi_B^{ял} + T_B^{бл}\sin\alpha_B^{бл}\,s$$

$$T_{0Z}^{xp} = -T_0\sin\alpha_0^{xp}\varphi_0^{xp} = -(T_B^{ял}\sin\alpha_B^{ял}\cos\varphi_B^{л} + T_B^{бл}\sin\alpha_B^{бл}\,c$$

Откуда следует

$$T_0^{xp} = \sqrt{(T_{0X}^{xp})^2 + (T_{0Y}^{xp})^2 + (T_{0Z}^{xp})^2} \qquad (5)$$

$$tg\varphi_0^{xp} = -T_{OY}^{xp}/T_{OZ}^{xp};\ tg\beta_0^{xp} = -T_{OZ}^{xp}/(T_{OX}^{xp}\cos\varphi_0^{xp});\quad \beta_0^{xp} < 0;\ \alpha_0^{xp} = 2\pi + \beta_0^{xp},$$

где T_{OX}^{xp}, T_{OY}^{xp}; T_{OZ}^{xp} – проекции на оси *x*, *y*, *z* натяжения хребтины в точке A_1; $T_B^{л}, T_B^{бл}$ – натяжения якорного линя и буйлиня в точке *B*; $\alpha_B^{л}, \varphi_B^{л}, \alpha_B^{бл}, \varphi_B^{бл}$ – углы атаки и крена плоскости потока якорного линя и буйлиня в точке *B*; $h, h^{ял}, h^{бл}, h_{p1}, h_{p2}$ – соответственно глубина моря, высота якорного линя, высота буйлиня, глубина верхней и нижней кромки стаи рыбы.

При расчете характеристик хребтин рыболовных ярусов необходимо учитывать действие крючковых поводцов на хребтину. В модели действие поводцов на хребтину заменяется равномерно распределенной по длине хребтины нагрузкой. Характеристики хребтины определяются путем численного решения задачи Коши для дифференциальных уравнений равновесия хребтины в потоке, нагруженной силами веса в воде, гидродинамическими силами и равномерно распределенными силами от натяжения крючковых поводцов. В этом случае начальные данные для расчета хребтины на i-м участке определяются только один раз в начале участка.

Начальные данные $\alpha_{A_1}^{xp} = \alpha_0^{xp}$, $\varphi_{A_1}^{xp} = \varphi_0^{xp}$, $T_{A_1}^{xp} = T_0^{xp}$ для решения систем (2, 3, 4) зависят от величины погружения текущего промежуточного буя. Краевые условия для всех элементов яруса приведены в табл. 1.

Выполнение краевых условий для систем (2, 3, 4) осуществляется вариацией глубины погружения буя.

Таблица 1

Краевые условия для всех элементов яруса

Table 1

Regional conditions for all elements of a longline

Левый якорный линь	$l = 0$:	$x_A = y_A = z_A = 0;\quad \alpha_0 = \alpha_A; \varphi_0 = \varphi_A; T_0 = T_A;$
	$l = l_{ял}$:	$z_B = -h_{ял}$
Первый буйлинь	$l = 0$:	$x_{C_1} = y_{C_1} = z_{C_1} = 0;\quad \alpha_0 = \alpha_{C_1}; \varphi_0 = \varphi_{C_1}; T_0 = T_{C_1};$
	$l = l_{бл}$	$z_{D_1} = h_{бл}$
Первый участок яруса	$l = 0$:	$x_{A_1} = x_B; y_{A_1} = y_B; z_{A_1} = z_B;\quad \alpha_0 = \alpha_{A_1}; \varphi_0 = \varphi_{A_1}; T_0 = T_{A_1};$
	$l = l_{xp}$:	$z_{B_1} = z_{A_1} = -h_{ял}$
Второй участок яруса	$l = 0$:	$x_{A_2} = x_{B_1}; y_{A_2} = y_{B_1}; z_{A_2} = z_{B_1};\quad \alpha_0 = \alpha_{A_2}; \varphi_0 = \varphi_{A_2}; T_0 = T_{A_2};$
	$l = l_{xp}$:	$z_{B_1} = z_{A_2} = -h_{ял}$
i-й участок яруса	$l = 0$:	$x_{A_i} = x_{B_{i-1}}; y_{A_i} = y_{B_{i-1}}; z_{A_i} = z_{B_{i-1}};\quad \alpha_0 = \alpha_{A_i}; \varphi_0 = \varphi_{A_i}; T_0 = T_{A_i};$
	$l = l_{xp}$:	$z_{B_{i-1}} = z_{A_i} = -h_{ял}$
Правый якорный линь	$l = 0$:	$x^0_л = x_{B_i}; y^0_л = y_{B_i}; z^0_{л\,i} = z_{B_i};\quad \alpha_0 = \alpha_{B_i} + \Delta; \varphi_0 = \varphi_{B_i} + \Delta; T_0 = T_{B_i};$
	$l = l_{ял}$:	$z_D = 0$

Кроме этого, при расчете систем (2-4) необходимо учитывать наличие особой точки. Особая точка – это точка, в которой хребтина располагается по касательной к горизонту. В этой точке

$$dz / dl = -\sin\alpha\cos\varphi = 0. \qquad (6)$$

Из этого уравнения следует, что в особой точке выполняются условия:

- плоская хребтина (лежит в плоскости *xz*): $\alpha = 0; 180; 360^0; \varphi = 0$;
- пространственная хребтина:

$$\alpha \neq 0; 180; 360^0; \varphi = \pm\pi/2. \qquad (7)$$

При наличии особой точки хребтину следует представить в виде двух ветвей и стыковать решение каждой из веток, используя условия (7).

Характеристики буйлиня и якорного линя в точке *B* получаются путем решения задачи Коши для дифференциальных уравнений их равновесия. Начальные данные для буйлиня $T_0^{бл}; \alpha_0^{бл}; \varphi_0^{бл}$ при этом определяются в зависимости от величины погружения буя. При различных скоростях потока буй погружается на разную глубину, а форма буйлиня имеет вид, показанный на рис. 6.

Расчет характеристик хребтин последующих участков пелагического яруса в потоке осуществляется аналогично расчету хребтины первого участка, но уравнение стыковки использует вместо характеристик якорного линя $\alpha_B^л; \varphi_B^л;\ T_B^л$ характеристики хребтины предыдущего участка $\alpha^{xp}_{A_{i-1}}$, $\varphi^{xp}_{A_{i-1}}$, $T^{xp}_{A_{i-1}}$.

При моделировании было замечено, что с увеличением скорости течения увеличивается выдувание хребтины в сторону потока и уменьшается стрелка прогиба хребтины (рис. 7, 8).

Характеристики трех участков пелагического яруса (рис. 6), полученные компьютерным моделированием при *V* = 0,2 м/с, приведены в табл. 2.

При моделировании установлено, что при $\gamma = 0$ натяжение хребтины максимально на последнем против течения участке, поэтому расчет хребтины на прочность надо вести по ее натяжению на последнем участке.

Форма хребтины яруса, установленного под углом $\gamma = 87{,}5°$ к потоку, показана на рис. 8.

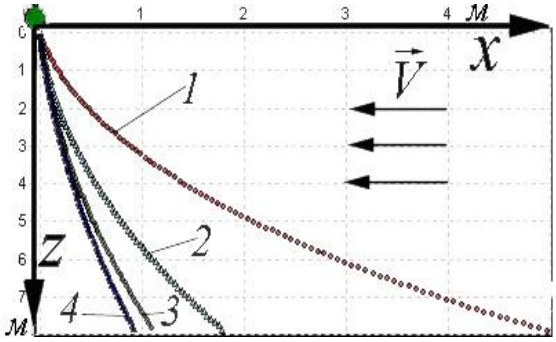


Рис. 6. Формы буйлиня для буя диаметром 0,25 м при скорости $V = 0{,}5$ м/с и различных погружениях буя $h_б / D_б$: 1 – 0,35; 2 – 0,5; 3 – 0,7; 4 – 0,9
Fig. 6. Forms buoyline for buoy in diameter 0,25 m at speed $V = 0{,}5$ km/s at various immersings buoy $h_б / D_б$: 1 – 0,35; 2 – 0,5; 3 – 0,7; 4 – 0,9

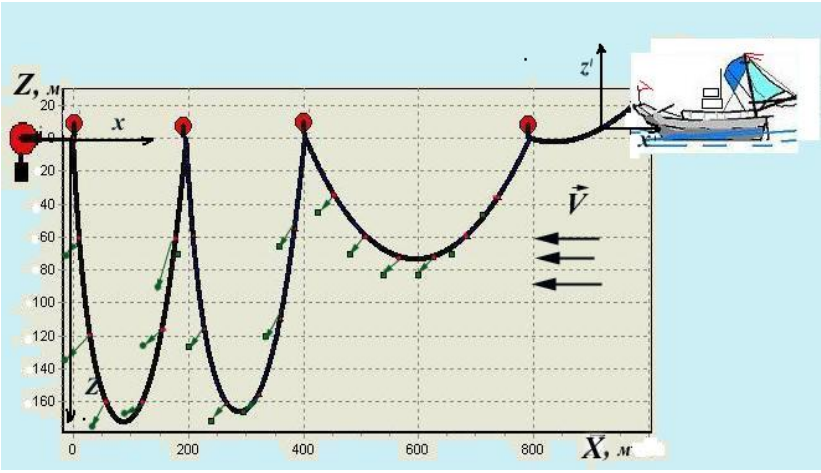


Рис. 7. Общий вид проекции дрейфующего крючкового яруса на плоскость *xz*
Fig. 7. A general view of a projection of a drifting hook longnine on a plane *xz*

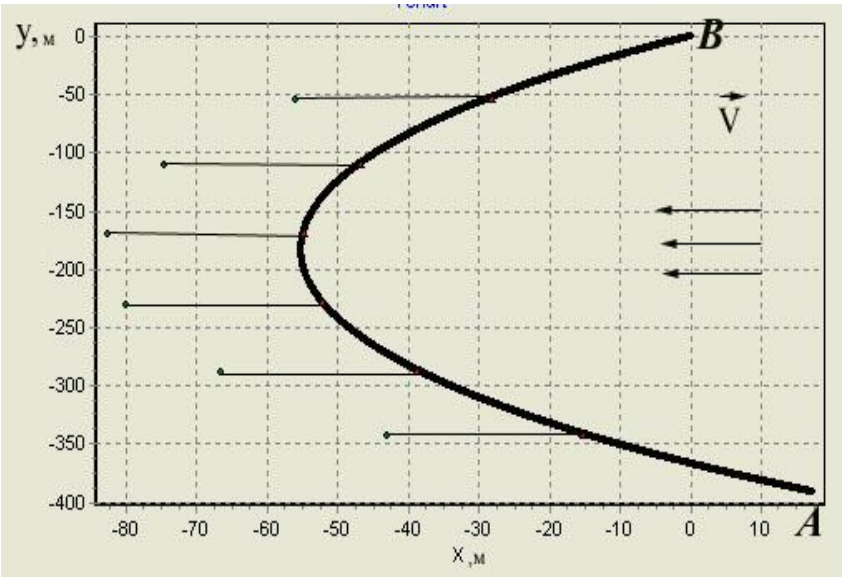


Рис. 8. Проекция первого участка хребтины крючкового яруса на плоскость горизонта при $V = 0{,}2$ м/с и $\gamma = 87{,}5°$
Fig. 8. A projection of the first site the mainline a hook longline on a plane of horizon at $V = 0{,}2$ м/с end $\gamma = 87{,}5°$

Таблица 2

Характеристики трех участков пелагического яруса, полученные компьютерным моделированием при $V = 0{,}2$ м/с

Table 2

Characteristics of three sites pelagic a longline, received by computer modelling at $V = 0{,}2$ m/c

Наименование	1-й участок		2-й участок		3-й участок		Вожак в воде	
	начало	конец	начало	конец	начало	конец	начало	конец

характеристик								
T, Н	12,34	12,96	12,17	13,11	19,37	20,88	22,85	20,86
α, °	277,0	75,3	279,0	73,92	320,0	36,72	352,0	36,0
φ°	0,04	0,105	0,117	360,1	0,112	0,36	1,415	0,36
$K_{потоп}$	0,412		0,354		0,357		0,3	
Хорда, м	196		204		395		80	

Заключение

Получена расчетная схема и математическая модель хребтины яруса, позволяющая осуществлять компьютерное моделирование любых типов крючковых ярусов, находить форму, натяжение и сопротивление хребтин, а также определять характеристики якорных линей, буйлиней и промежуточных буев, что позволяет осуществлять оптимальную промысловую настройку ярусов при любых значениях скоростей течения и выметке яруса под любым углом к потоку.

Список литературы

1. Светлицкий В.А. Механика гибких стержней и нитей. – М.: Машиностроение, 1978. – С. 222.
2. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. – М.:Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2010. – С. 590.
3. Габрюк В.И., Кулагин В.Д. Механика орудий рыболовства и АРМ промысловика. – М.: Колос, 2000. – С. 416.
4. Габрюк В.И., Габрюк А.В., Осипов Е.В. Моделирование крючковых рыболовных систем. – Владивосток: ТИНРО-Центр, 2004. – С. 120.
5. Габрюк В.И., Кокорин Н.В., Осипов Е.В., Чернецов В.В. Механика орудий рыболовства. – Владивосток: ТИНРО-Центр, 2006. – С. 306.
6. Габрюк В.И, Здорова Л.А. Математическое моделирование ярусов // Изв. ТИНРО. – 2007. – № 150. – С. 148-152.
7. Габрюк Л.А. Методика моделирование хребтин ярусов // Изв. ТИНРО. – 2008. – № 151. – С. 269-277.
8. Габрюк Л.А., Габрюк В.И. Исследование горизонтальных придонных ярусов, выметываемых под углом к течению // Изв. ТИНРО. – 2010. – № 161. – С. 148-152.
9. Кокорин Н.В. Лов рыбы ярусами. – М.: ВНИРО, 1994. – С. 421.
10. Метелкин Л.И. Теоретическое исследование процесса выборки тунцеловного яруса // Тр. КТИРПиХ. – 1962. – В. XIV. – С. 53-67.
11. Маркин В.А. Экспериментальные исследования натяжения хребтины при выборке тунцеловных ярусов // Рыб. хоз-во. – 1971. – № 10. – С. 52-53.

Сведения об авторе: Габрюк Людмила Анатольевна, кандидат технических наук, доцент, e-mail: gabrukvi@rambler.ru.