

УДК 639.2.081.117.004.9

В.В. Чернецов*

ООО «Фиш-Тайм»,

690018, г. Владивосток, ул. Ильичёва, 14

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАЛОВЫХ ДОСОК С УЧЁТОМ ТЕЧЕНИЙ

Изложены математическая модель траловых досок и методика их моделирования при наличии течений в районе промысла. Данная модель может быть использована для оптимальной промысловой настройки траловых систем с учетом течений.

Ключевые слова: траловая доска, математическая модель, течения, компьютерное моделирование.

Chernetsov V.V. Modeling of trawl doors with account of the currents // Izv. TINRO. — 2016. — Vol. 185. — P. 267–272.

Mathematical model of trawl doors is presented and methods of their modeling with account of the water currents are described. The model could be used for optimal tooling of trawl systems for real environments.

Key words: trawl door, mathematical model, current, modeling.

Введение

Разработке методов моделирования траловых досок посвящены многие работы (Рыкунов, 1972; Габрюк, 1988, 1995; Габрюк, Кулагин, 2000; Reite, 2006; Габрюк и др., 2008; Габрюк, Чернецов, 2016). При этом моделирование выполнялось без учёта влияния течений на работу досок.

Учёт течений особенно важен при тралении на склонах, например при траловом лове командорского кальмара на материковом океаническом склоне Курильских островов. Эти районы изобилуют большими течениями, нарушающими нормальную работу траловых досок, поэтому необходимо иметь триаду: математическая модель — алгоритм — программа, которая позволяла бы выполнять компьютерное моделирование траловых досок и траловых систем для тралений в таких районах.

В предлагаемой работе рассматриваются результаты исследований влияния течений на поведение траловых досок.

Материалы и методы

При исследовании траловых досок, как правило, используют три системы координат: земную ($x_g y_g z_g$), связанную с доской (досковую) ($x_D y_D z_D$) и поточную ($x_V y_V z_V$) (рис. 1).

Для определения характеристик траловых досок необходимо установить связь между этими системами координат.

* Чернецов Виктор Владимирович, кандидат технических наук, генеральный директор, e-mail: song_fish@mail.ru.

Chernetsov Victor V., Ph.D., director general, e-mail: song_fish@mail.ru.

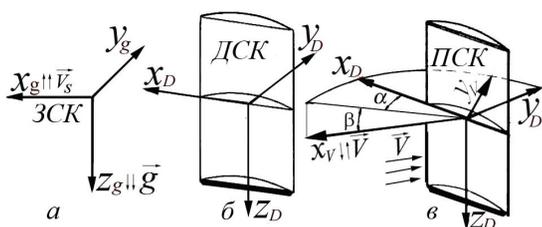


Рис. 1. Системы координат траловой доски: а — земная; б — досковая; в — поточная

Fig. 1. Coordinate systems of trawl door: а — terrestrial; б — door-related; в — flow-related

От поточной к досковой системе можно перейти двумя поворотами на углы α и β (α — угол атаки доски; β — угол скольжения потока). Эти повороты описываются матричным уравнением

$$\begin{pmatrix} \vec{i}_v \\ \vec{j}_v \\ \vec{k}_v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha \cos \beta; -\sin \alpha \cos \beta; \sin \beta \\ \sin \alpha; \cos \alpha; 0 \\ -\cos \alpha \sin \beta; \sin \alpha \sin \beta; \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{i}_1 \\ \vec{j}_1 \\ \vec{k}_1 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

От земной системы координат к связанной можно перейти тремя поворотами на углы λ (угол крена доски), β , α (рис. 2) согласно схеме

$$xyz \frac{\lambda}{x, x'} x' y' z' \frac{\beta_1}{y', y''} x'' y'' z'' \frac{\alpha_1}{z'', z_1} x_1 y_1 z_1.$$

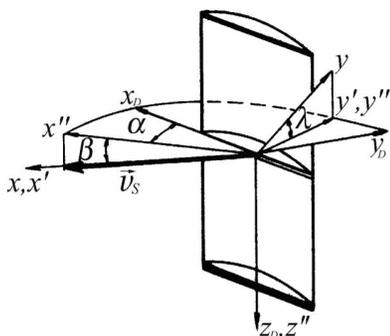


Рис. 2. Углы $\alpha_1, \beta_1, \lambda$, задающие ориентацию доской системы координат x_1, y_1, z_1 относительно земной системы xyz

Fig. 2. Angles determining the coordinate system of trawl door relative to the terrestrial system

Эти повороты описываются матричным уравнением

$$\begin{pmatrix} \vec{i}_1 \\ \vec{j}_1 \\ \vec{k}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha_1 \cos \beta_1; \sin \alpha_1 \cos \lambda + \cos \alpha_1 \sin \beta_1 \sin \lambda; \\ \sin \alpha_1 \sin \lambda - \cos \alpha_1 \sin \beta_1 \cos \lambda \\ -\sin \alpha_1 \cos \beta_1; \cos \alpha_1 \cos \lambda - \sin \alpha_1 \sin \beta_1 \sin \lambda; \\ \cos \alpha_1 \sin \lambda + \sin \alpha_1 \sin \beta_1 \cos \lambda \\ \sin \beta_1; -\cos \beta_1 \sin \lambda; \cos \beta_1 \cos \lambda \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{i} \\ \vec{j} \\ \vec{k} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1) и выполняя умножения матриц, получим связь между базами поточной (x_v, y_v, z_v) и земной (xyz) систем координат:

$$\begin{pmatrix} \vec{i}_v \\ \vec{j}_v \\ \vec{k}_v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \beta_1 \cos(\alpha - \alpha_1); -\cos \lambda \sin(\alpha - \alpha_1) + \\ + \sin \beta_1 \sin \lambda \cos(\alpha - \alpha_1); \\ -\sin \lambda \sin(\alpha - \alpha_1) - \sin \beta_1 \cos \lambda \cos(\alpha - \alpha_1) \\ \cos \beta_1 \sin(\alpha - \alpha_1); \cos \lambda \cos(\alpha - \alpha_1) + \\ + \sin \beta_1 \sin \lambda \sin(\alpha - \alpha_1); \\ \sin \lambda \cos(\alpha - \alpha_1) - \sin \beta_1 \cos \lambda \sin(\alpha - \alpha_1) \\ \sin \beta_1; -\cos \beta_1 \sin \lambda; \cos \beta_1 \cos \lambda \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{i} \\ \vec{j} \\ \vec{k} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Выразим углы $\alpha_1, \beta_1, \lambda$ через проекции скорости течения \vec{V}_{sl} . Проецируя уравнение $\vec{V} = \vec{V}_{st} - \vec{V}_s = -V_i \vec{i}_v$ на оси земной системы координат (здесь \vec{V} — скорость потока; $V_i \vec{i}_v$ — векторная форма записи) и учитывая, что

$$\vec{i}_V = \cos \beta_1 \cos(\alpha_1 - \alpha) \vec{i} + [\cos \lambda \sin(\alpha_1 - \alpha) + \sin \beta_1 \sin \lambda \cos(\alpha_1 - \alpha)] \vec{j} + [\sin \lambda \sin(\alpha_1 - \alpha) - \sin \beta_1 \cos \lambda \cos(\alpha_1 - \alpha)] \vec{k},$$

получим

$$\left. \begin{aligned} -V \cos \beta_1 \cos(\alpha_1 - \alpha) &= V_{Stx} - V_S; \\ -V [\cos \lambda \sin(\alpha_1 - \alpha) + \sin \beta_1 \sin \lambda \cos(\alpha_1 - \alpha)] &= V_{Sty}; \\ -V [\sin \lambda \sin(\alpha_1 - \alpha) - \sin \beta_1 \cos \lambda \cos(\alpha_1 - \alpha)] &= V_{Stz}; \end{aligned} \right\} \Rightarrow \quad (4)$$

$$\sin(\alpha - \alpha_1) = (V_{Sty} \cos \lambda + V_{Stz} \sin \lambda) / V;$$

$$\operatorname{tg} \beta_1 = (V_{Sty} \sin \lambda - V_{Stz} \cos \lambda) / (V_{Stx} - V_S);$$

$$\vec{V} = \vec{V}_{St} - \vec{V}_S; \quad V^2 = (V_{Stx} - V_S)^2 + V_{Sty}^2 + V_{Stz}^2;$$

$$\sin \alpha_1 = A \sin \alpha - B \cos \alpha; \quad A = (V_S - V_{Stx}) / V \cos \beta_1;$$

$$\cos \alpha_1 = A \cos \alpha + B \sin \alpha; \quad B = (V_{Sty} \cos \lambda - V_{Stz} \sin \lambda) / V;$$

$$d(\operatorname{tg} \beta_1) / d\lambda = -\operatorname{tg}(\alpha - \alpha_1) / \cos \beta_1; \quad d(\cos \beta_1) / d\lambda = \sin \beta_1 \cos \beta_1 \operatorname{tg}(\alpha - \alpha_1);$$

$$d(\sin \beta_1) / d\lambda = -\cos^2 \beta_1 \operatorname{tg}(\alpha - \alpha_1); \quad d(\sin \alpha_1) / d\lambda = -\sin \beta_1 \cos \alpha_1;$$

$$d(\cos \alpha_1) / d\lambda = \sin \beta_1 \sin \alpha_1; \quad d(\sin \alpha_1) / d\alpha = \cos \alpha_1;$$

$$d(\cos \alpha_1) / d\alpha = -\sin \alpha_1.$$

$$\cos \lambda_1 = \vec{j}_1 \cdot \vec{k} = \cos \alpha_1 \sin \lambda (1 + \operatorname{tg} \alpha_1 \sin \beta_1 \operatorname{ctg} \lambda).$$

Здесь V_{St} , V_S — скорость течения и скорость судна; V_{Stx} , V_{Sty} , V_{Stz} — проекции скорости течения на оси земной системы координат. Если скорость течения лежит в плоскости горизонта ($V_{Sty} = V_{Stz} = 0$), то выполняются следующие соотношения:

$$\alpha_1 = \alpha, \quad \beta_1 = 0; \quad \vec{j}_1 \cdot \vec{k} = \cos \lambda_1 = \sin \lambda \cos \alpha \Rightarrow \sin \lambda_D = \sin \lambda \cos \alpha,$$

где λ_D — угол между вектором \vec{j}_1 и горизонтом.

Результаты и их обсуждение

Векторные уравнения равновесия доски. Траловая доска является твердым телом, поэтому для её равновесия необходимо и достаточно, чтобы геометрическая сумма всех внешних действующих на доску сил и сумма моментов этих сил относительно произвольного полюса равнялись нулю:

$$\vec{T}_0 + \vec{T}_1 + \vec{T}_2 + \vec{R} + \vec{Q} = \vec{0}, \quad (5)$$

$$\vec{M}_0(\vec{T}_1) + \vec{M}_0(\vec{T}_2) + \vec{M}_0(\vec{R}) + \vec{M}_0(\vec{Q}) = \vec{0}, \quad (6)$$

где \vec{T}_0 — натяжение ваера у доски; \vec{T}_1 , \vec{T}_2 — натяжение верхнего и нижнего кабелей; \vec{R} — гидродинамическая сила, действующая на доску; \vec{Q} — вес доски в воде.

Ниже приведены уравнения равновесия доски в проекциях на оси земной системы координат для двух вариантов.

1. Траление осуществляется параллельно течению. Проецируя уравнение (5) на оси x , y , z , получим

$$T_0 = |0,5R_x^T + R_x^D| / \cos \alpha_0;$$

$$S = \frac{\tilde{T}_1 \sin v_1 + \tilde{T}_2 \sin v_2 - \operatorname{tg} \alpha_0 \sin \varphi_0}{|C_{xV}^D \operatorname{tg} \alpha_0 \sin \varphi_0 + C_{yV}^D \cos \lambda - C_{zV}^D \sin \lambda|} \cdot \frac{0,5 |R_x^T|}{0,5 \rho V^2} = \tilde{S} \cdot \frac{|R_x^T|}{\rho V^2};$$

$$Q = \left[\begin{array}{l} (1 + |C_{xV}^D| \tilde{S}) \operatorname{tg} \alpha_0 \cos \varphi_0 - \\ - \operatorname{tg} \theta - \tilde{S} (C_{yV}^D \sin \lambda + C_{zV}^D \cos \lambda) \end{array} \right] 0,5 |R_x^T| = \tilde{Q} \cdot 0,5 |R_x^T|.$$

где S — площадь доски в плане; φ_0 — угол крена плоскости потока ваера у доски; ρ — плотность воды; θ — угол между равнодействующей натяжения всех кабелей и горизонтом.

2. Траление осуществляется под углом к течению. В этом случае условия равновесия имеют вид

$$T_0 = |0,5R_x^T + R_x^D|/\dot{x}_0;$$

$$S = \frac{\tilde{T}_1 \sin \nu_1 + \tilde{T}_2 \sin \nu_2 - \dot{y}_0/\dot{x}_0}{C_Y^D - C_X^D \dot{y}_0/\dot{x}_0} \cdot \frac{0,5|R_x^T|}{0,5\rho V^2} = \tilde{S} \frac{0,5|R_x^T|}{0,5\rho V^2};$$

$$Q_z^D = [-(1 + |C_{XV}^D| \tilde{S}) \dot{z}_0/\dot{x}_0 - tg\theta - C_z^D \tilde{S}] \cdot 0,5|R_x^T| = \tilde{Q} 0,5|R_x^T|;$$

$$\dot{x}_0 = \cos \alpha_0 \cos \gamma \cos \psi - \sin \alpha_0 \cos \gamma (\sin \psi \cos \varphi_0 + \sin \varphi_0 tg \gamma);$$

$$\dot{y}_0 = \sin \alpha_0 \sin \varphi_0 \cos \gamma - \sin \alpha_0 \cos \varphi_0 \sin \gamma \sin \psi + \cos \alpha_0 \sin \gamma \cos \psi;$$

$$\dot{z}_0 = -\sin \alpha_0 \cos \varphi_0 \cos \psi - \cos \alpha_0 \sin \psi;$$

$$\sin \psi = (V_{Sxz} - V_{Dz})/V; tg \gamma = (V_{Sxy} - V_{Dy})/(V_{Sxz} - V_{Dz});$$

$$C_X^D = C_{XV}^D \cos \beta_1 \cos(\alpha - \alpha_1) + C_{YV}^D \cos \beta_1 \sin(\alpha - \alpha_1) + C_{ZV}^D \sin \beta_1;$$

$$C_Y^D = -C_{XV}^D [\cos \lambda \sin(\alpha - \alpha_1) - \sin \beta_1 \sin \lambda \cos(\alpha - \alpha_1)] +$$

$$+ C_{YV}^D [\cos \lambda \cos(\alpha - \alpha_1) + \sin \beta_1 \sin \lambda \sin(\alpha - \alpha_1)] - C_{ZV}^D \cos \beta_1 \sin \lambda;$$

$$C_Z^D = -C_{XV}^D [\sin \lambda \sin(\alpha - \alpha_1) + \sin \beta_1 \cos \lambda \cos(\alpha - \alpha_1)] +$$

$$+ C_{YV}^D [\sin \lambda \cos(\alpha - \alpha_1) - \sin \beta_1 \cos \lambda \sin(\alpha - \alpha_1)] + C_{ZV}^D \cos \beta_1 \cos \lambda.$$

Здесь ν_1 — угол между верхним кабелем и диаметральной плоскостью трала; ν_2 — угол между нижним кабелем и диаметральной плоскостью трала; γ, ψ — углы, задающие ориентацию ваера в пространстве; $C_{XV}^D, C_{YV}^D, C_{ZV}^D$ — коэффициенты силы сопротивления, подъемной и боковой сил доски; V_{Dx}, V_{Dy}, V_{Dz} — проекции скорости доски на оси земной системы координат.

Моментные уравнения равновесия доски. Проецируя уравнение (6) на оси связанной с доской системы координат, получим

$$\sum M_Z(\vec{F}_k) = 0 \Rightarrow a_2 x_0 - a_1 y_0 = b_1;$$

$$\sum M_Y(\vec{F}_k) = 0 \Rightarrow a_3 x_0 - a_1 z_0 = b_2; \quad (7)$$

$$\sum M_X(\vec{F}_k) = 0 \Rightarrow a_3 y_0 - a_2 z_0 = b_3;$$

$$a_i = \tilde{T}_{1i} + \tilde{T}_{2i} + \tilde{R}_i + \tilde{Q}_i; \quad i \in \{1; 2; 3\};$$

$$b_1 = \tilde{T}_{12} x_1 - \tilde{T}_{11} y_1 + \tilde{T}_{22} x_2 - \tilde{T}_{21} y_2 + x_D \tilde{R}_2 - y_D \tilde{R}_1 + x_C \tilde{Q}_2 - y_C \tilde{Q}_1;$$

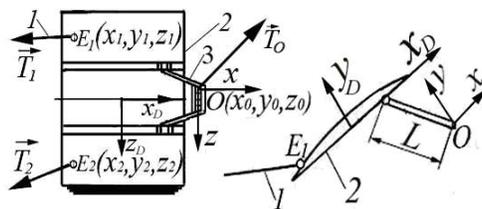
$$b_2 = \tilde{T}_{13} x_1 - \tilde{T}_{11} z_1 + \tilde{T}_{23} x_2 - \tilde{T}_{21} z_2 + x_D \tilde{R}_3 - z_D \tilde{R}_1 + x_C \tilde{Q}_3 - z_C \tilde{Q}_1;$$

$$b_3 = \tilde{T}_{13} y_1 - \tilde{T}_{12} z_1 + \tilde{T}_{23} y_2 - \tilde{T}_{22} z_2 + y_D \tilde{R}_3 - z_D \tilde{R}_2 + y_C \tilde{Q}_3 - z_C \tilde{Q}_2.$$

Здесь M_Z, M_Y, M_X — моменты силы относительно осей z, y, x ; \vec{F}_k — сила, приложенная к доске; $x_0, y_0, z_0; x_1, y_1, z_1; x_2, y_2, z_2$ — координаты точек крепления ваера, верхней и нижней лапок к доске в связанной системе координат; $x_D, y_D, z_D; x_C, y_C, z_C$ — координаты центра давления и центра тяжести доски; $\tilde{T}_{11}, \tilde{T}_{12}, \tilde{T}_{13}; \tilde{T}_{21}, \tilde{T}_{22}, \tilde{T}_{23}$ — проекции натяжений верхнего \tilde{T}_1 и нижнего \tilde{T}_2 кабелей на оси связанной системы координат; $\tilde{R}_1, \tilde{R}_2, \tilde{R}_3; \tilde{Q}_1, \tilde{Q}_2, \tilde{Q}_3$ — проекции гидродинамической силы \vec{R} и веса доски в воде \vec{Q} на оси досковой системы координат.

В уравнениях (7) моменты берутся относительно осей системы координат $хуз$, оси которой проходят через точку O крепления ваера к доске и параллельны осям досковой системы координат (рис. 3).

Рис. 3. Параметры доски: 1 — лапки; 2 — щиток; 3 — дуга
 Fig. 3. Parameters of trawl board: 1 — bridles; 2 — screen; 3 — arc



Условие совместности моментных уравнений равновесия доски. Моментные уравнения равновесия доски (7) являются системой линейных алгебраических уравнений. Эта система совместна тогда, когда выполняется условие теоремы Кронекера-Капелли

$$(a_1 b_3 + b_1 a_3 - a_2 b_2) = 0,$$

раскрывая которое, получим

$$\begin{aligned} & (a_3 \tilde{T}_{12} - a_2 \tilde{T}_{13})x_1 + (a_1 \tilde{T}_{13} - a_3 \tilde{T}_{11})y_1 + (a_2 \tilde{T}_{11} - a_1 \tilde{T}_{12})z_1 + \\ & + (a_3 \tilde{T}_{22} - a_2 \tilde{T}_{23})x_2 + (a_1 \tilde{T}_{23} - a_3 \tilde{T}_{21})y_2 + (a_2 \tilde{T}_{21} - a_1 \tilde{T}_{22})z_2 + \\ & (a_3 \tilde{R}_2 - a_2 \tilde{R}_3)x_D + (a_1 \tilde{R}_3 - a_3 \tilde{R}_1)y_D + (a_2 \tilde{R}_1 - a_1 \tilde{R}_2)z_D + \\ & + (a_3 \tilde{Q}_2 - a_2 \tilde{Q}_3)x_C + (a_1 \tilde{Q}_3 - a_3 \tilde{Q}_1)y_C + (a_2 \tilde{Q}_1 - a_1 \tilde{Q}_2)z_C = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

В системе (7) независимы только два уравнения. Таким образом, система моментных уравнений (7) и уравнение совместности (8) дают только три уравнения для определения девяти координат точек крепления ваера и лапок к доске. Для их определения необходимо также использовать геометрические условия, вытекающие из конструкции доски. Обычно точки крепления верхней и нижней лапок к доске располагаются на прямой, параллельной оси z_1 , поэтому выполняются условия: $x_1 = x_2, y_1 = y_2$.

Условия устойчивости равновесия доски. Траление бывает успешным только при условии, что доски движутся устойчиво. Равновесие траловой доски оказывается устойчивым, если выполняются следующие условия:

- вектор скорости потока параллелен стрингерам доски, в этом случае $\beta = 0$;
- угол атаки доски меньше критического, т.е. $\alpha < \alpha_{kp}$;
- производные от главных моментов по углу крена и углу атаки должны быть отрицательными, т.е.

$$\partial M_1 / \partial \lambda = M_1^\lambda < 0, \quad \partial M_3 / \partial \alpha = M_3^\alpha < 0,$$

где ∂ — частная производная от главных моментов всех сил, действующих на доску по параллельным x и z .

Раскрывая эти неравенства, получим

$$\begin{aligned} M_1^\lambda &= (y_C - y_0) \tilde{Q}_3^\lambda - (z_C - z_0) \tilde{Q}_2^\lambda + (y_1 - y_0) \tilde{T}_{13}^\lambda - \\ & - (z_1 - z_0) \tilde{T}_{12}^\lambda + (y_2 - y_0) \tilde{T}_{23}^\lambda - (z_2 - z_0) \tilde{T}_{22}^\lambda < 0; \\ M_3^\alpha &= (x_D - x_0) \tilde{R}_2^\alpha - (y_D - y_0) \tilde{R}_1^\alpha + (x_C - x_0) \tilde{Q}_2^\alpha - \\ & - (y_C - y_0) \tilde{Q}_1^\alpha + (x_1 - x_0) \tilde{T}_{12}^\alpha - (y_1 - y_0) \tilde{T}_{11}^\alpha + \\ & + (x_2 - x_0) \tilde{T}_{22}^\alpha - (y_2 - y_0) \tilde{T}_{21}^\alpha + x_D^\alpha \tilde{R}_2 - y_D^\alpha \tilde{R}_1 < 0. \end{aligned}$$

Выводы

Получены уравнения связи между характеристиками траловых досок, вытекающие из геометрических условий, условий равновесия и условий устойчивости равновесия для двух случаев, когда траление осуществляется параллельно течению (как по течению, так и против течения) и под углом к течению. Эти уравнения позволяют определять площадь траловой доски в плане, ее массу, координаты точек крепления к доске ваера и лапок таким образом, чтобы обеспечивалось устойчивое движение траловых досок, а значит и всей траловой системы.

Вышеописанная математическая модель может использоваться для оптимальной промышленной настройки траловых систем с учетом течений.

Список литературы

Габрюк В.И. Компьютерные технологии в промышленном рыболовстве : моногр. — М. : Колос, 1995. — 544 с.

Габрюк В.И. Параметры разноглубинных тралов : моногр. — М. : Агропромиздат, 1988. — 212 с.

Габрюк В.И., Кулагин В.Д. Механика орудий рыболовства и АРМ промысловика : моногр. — М. : Колос, 2000. — 416 с.

Габрюк В.И., Чернецов В.В. Проектирование и моделирование орудий океанического рыболовства : моногр. — Владивосток : МГУ, 2016. — 405 с.

Габрюк В.И., Чернецов В.В., Бойцов А.Н. Основы моделирования рыболовных систем : моногр. — Владивосток : Дальрыбвтуз, 2008. — 560 с.

Рыкунов Э.М. Исследование работы семи конструкций траловых досок при пелагическом тралении // Изв. ТИНРО. — 1972. — Т. 84. — С. 6–37.

Reite K.-J. Modeling and control of trawl systems : doctoral thesis for the degree of doctor ingeniør. — Trondheim : NTNU, 2006. — 250 p.

Поступила в редакцию 17.03.16 г.