

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

Научная статья

УДК 639.2.081.117.21

DOI: doi.org/10.48612/dalrybvtuz/2026-76-25

EDN: ZFXRCC

Динамика системы «судно–глубоководный трал» при донном зацеплении трала

Станислав Владимирович Терлыч

Херсонская государственная морская академия, Херсон, Россия

rn6ay@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-6044-3087

Аннотация. Рассмотрена динамическая система «судно–траулер» вместе с глубоководным тралом в условиях зацепления трала (траловой доски) за дно. Сформулирована задача решения с использованием преобразований Лапласа во времени. Получены аналитические зависимости для определения сил в ваере и исследования динамики судна.

Ключевые слова: судно–траулер, ваер, динамика гибких связей

Для цитирования: Терлыч С. В. Динамика системы «судно–глубоководный трал» при донном зацеплении трала // Научные труды Дальрыбвтуза. 2026. Т. 76, № 2. С. 238–242.

Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University. 2026. Vol. 76, no. 2. P. 238–242.

MARINE POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)

Original article

The dynamics of the "vessel-deep-sea trawl" system during trawl bottom engagement

Stanislav V. Terlych

Kherson State Maritime Academy, Kherson, Russia

rn6ay@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-6044-3087

Abstract. The dynamic system "trawler vessel" together with a deep-sea trawl in conditions of the trawl (trawl board) engagement with the bottom is considered. The problem of solution using Laplace transformations in time is formulated. Analytical dependences are obtained for determining the forces in the vaer and studying the dynamics of the vessel.

Keywords: trawler vessel, warp, dynamics of flexible connections

For citation: Terlych S. V. The dynamics of the "vessel-deep-sea trawl" system during trawl bottom engagement. *Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University*. 2026; 76(2):238–242. (In Russ.).

Введение и постановка задач

В связи с уменьшением рыбных ресурсов морей и океанов на малых глубинах (500–1000 м) [1] и введением двухсотмильных зон запрета лова [2], большинство прибрежных государств всё большее внимание уделяют проблеме глубоководного тралового промысла, а также исследованиям в родственных сферах.

Предупреждение аварийных ситуаций при этом (зацепление трала за дно) имеет важное значение как с точки зрения безопасности судоходства, так и с точки зрения сохранения самого трала.

Анализ литературы по теме исследования

Динамические нагрузки в системе «судно↔ваер↔трал» при выборе трала подробно описаны в [3]. В [4] сформулирована проблема математического моделирования системы «судно↔глубоководный трал».

Широкий анализ проблемы включает моделирование как технологических процессов работы с тралом, так и аварийных ситуаций. В статьях [5, 6] предложена математическая модель аварийного зацепления траловой доски за донную преграду. При этом ваер описан как волновод с импульсным напряжением с одного судна, а длина возмущающей волны не даёт возможности прогнозировать поведение ваера при других (широко распространённых в рыболовстве) режимах работы трала.

Цель статьи – рассмотреть случай, при котором длина возмущённой волны превышает длину трала.

Принятые допущения. Судно-траулер при буксировке глубоководного донного трала движется с расчётной скоростью v_0 . Глубина траления h , длина вытраленной части ваера L . В результате зацепления трала за донную преграду нижнего конца ваера в момент времени $t = 0$ считается закреплённым. Судно, двигаясь по инерции, растягивает ваер, а после этого осуществляются затухающие продольные колебания. В общем случае на судно может действовать сопротивление винта P_0 .

Изложение основного материала

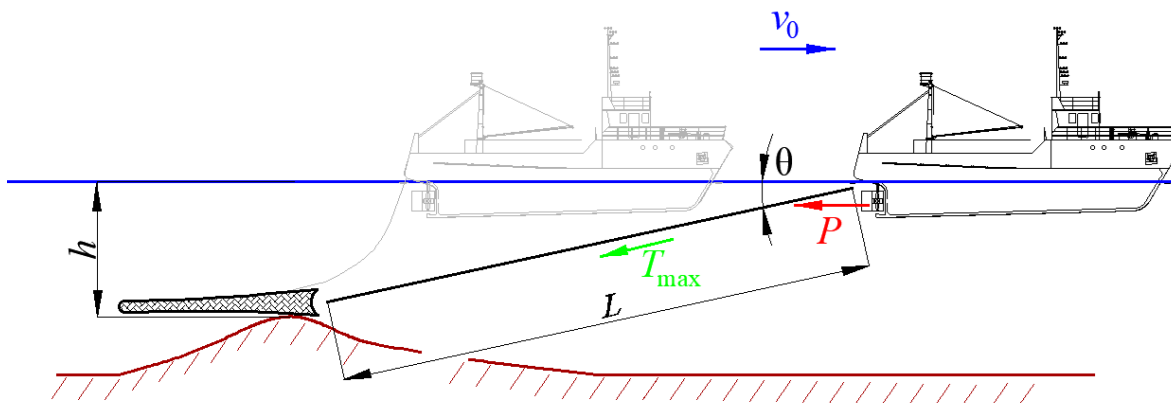
В статье ваер представлен прямолинейным отрезком растянутой упругой нити длиной L . Линия ваера создаёт угол θ_0 с плоскостью дна (или поверхности воды), рисунок. Тогда

$$\cos \theta_0 = \sqrt{1 - \left(\frac{h}{L}\right)^2}. \quad (1)$$

В рамках принятых допущений определена максимальная сила растяжения ваера. При этом предположено, что вся кинетическая энергия судна переходит в потенциальную энергию растянутого судном упругого ваера. Накопленная судном энергия представлена выражением

$$K_0 = \frac{1}{2}(\Delta + \mu)v^2, \quad (2)$$

где Δ – массовое водоизмещение судна; μ – присоединённые массы забортной воды при движении судна.



Расчётная схема натяжения ваера при зацеплении за препятствие. Составлено автором
Calculation of the warp tension when it catches on an obstacle. Compiled by the author

Потенциальная энергия растянутого ваера представлена зависимостью

$$\Pi_0 = \frac{1}{2} T_0 U_0, \quad (3)$$

где T_0 – максимальное усилие на растяжение ваера; U_0 – величина деформации ваера.

Кроме зависимостей (1) и (2) учтено, что

$$T_0 = (ES)_b \frac{U_0}{L}, \quad (4)$$

где E – модуль упругости первого рода материала ваера; S – площадь поперечного сечения ваера.

Подставив (4) в (3), получено

$$\Pi_0 = \frac{1}{2} b U_0^2, \quad (5)$$

здесь $b = L^{-1}(ES)_b$.

Приравняв правые части (2) и (5), получено

$$U_0 = v_0 \sqrt{\frac{\Delta + \mu}{b}}; \quad (6)$$

$$T_0 = b U_0 = v_0 \sqrt{(\Delta + \mu)b}. \quad (7)$$

Если учесть, что накопленная судном энергия переходит в упругие колебания системы судно↔ваер, поточная величина кинетической энергии судна составит

$$K(t) = \frac{1}{2} (\Delta + \mu) v^2(t), \quad (8)$$

где $v(t) = \dot{x}(t)$ – поточное значение скорости судна.

Поточное значение потенциальной энергии ваера:

$$\Pi(t) = \frac{1}{2} b U^2(t), \quad (9)$$

где $U(t)$ – поточное значение величины деформации ваера.

Здесь

$$U(t) = x(t) \cos \theta_0, \quad (10)$$

где $x(t)$ – поточная координата положения судна, $x(0) = 0$. Тогда

$$\Pi(t)' = \frac{1}{2} (b \cos^2 \theta) \dot{x}^2(t). \quad (11)$$

Введя к рассмотрению диссипативную функцию Релея [7]:

$$R = \frac{1}{2} \alpha \dot{x}^2, \quad (12)$$

уравнение Лагранжа для рассматриваемого случая будет иметь вид

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial k}{\partial \dot{x}} = - \frac{\partial \Pi}{\partial x} - \frac{\partial R}{\partial \dot{x}}. \quad (13)$$

Подставив в уравнение (13) выражения (8), (10) и (12), получено уравнение свободных колебаний судна:

$$(\Delta + \mu) \ddot{x} + \alpha \dot{x} + (b \cos^2 \theta) x = 0. \quad (14)$$

Уравнение (14) можно записать в каноническом виде:

$$\ddot{x} + 2n \dot{x} + \omega_0^2 x = 0, \quad (15)$$

где

$$2n = \frac{\alpha}{\Delta + \mu}; \quad (16)$$

$$\omega_0^2 = \frac{b \cos^2 \theta}{\Delta + \mu}. \quad (17)$$

В случае действия на судно сопротивления гребного винта $P(t)$, вместо уравнений (15)–(17) имеет место уравнение вынужденных колебаний

$$\ddot{x} + 2n\dot{x} + \omega_0^2 x = F(t), \quad (18)$$

где $F(t) = \frac{P(t)}{\Delta + \mu}$.

Ограничившись рассмотрением малого промежутка времени t , можно предположить, что сопротивление гребного винта неизменно, т.е.

$$P(t) = P_0 l_\tau(t), \quad (19)$$

где $l_\tau(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } t < 0; \\ 1, & \text{при } t \geq 0. \end{cases}$

В результате получено следующее формулирование задачи:

$$\ddot{x} + 2n\dot{x} + \omega_0^2 x = F_0; \quad x(0) = 0; \quad \dot{x}(0) = v_0, \quad (20)$$

где $F_0 = \frac{P_0}{\Delta + \mu}$.

Задачу (20) рационально решить операционным методом (преобразования Лапласа по времени t):

$$\begin{aligned} x(t) &= \frac{F_0}{n^2 + \omega^2} \left[1 - e^{-nt} \left(\cos \omega t + \frac{n}{\omega} \sin \omega t \right) \right] + \frac{v_0}{\omega} \sin \omega t; \\ \dot{x}(t) &= e^{-nt} \left[v_0 \cos \omega t - \left(v_0 - \frac{F_0}{n} \right) \frac{n}{\omega} \sin \omega t \right], \end{aligned} \quad (21)$$

где $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - n^2}$.

Решению задачи удовлетворяют начальные условия $x(0) = 0$; $\dot{x}(0) = v_0$. Далее найдено точное поточное значение для динамической среды в ваере:

$$\begin{aligned} T(t) &= \frac{(ES)_b}{L} U(t) = \frac{(ES)_b \cos \theta_0}{L} x(t), \\ T(t) &= \frac{(ES)_b \cos \theta_0 F_0}{L \omega_0} \left\{ 1 + e^{-nt} \left[\frac{\left(\frac{v_0 \omega_0}{F_0} - n \right)}{\sqrt{\omega_0^2 - n^2}} \times \sin \omega t - \cos \omega t \right] \right\}. \end{aligned} \quad (22)$$

Максимальное значение силы

$$T_{\max} \cong \frac{(ES)_b F_0 \cos \theta_0}{L \omega_0} \left\{ 1 + \frac{\frac{v_0 \omega_0}{F_0} - n}{\sqrt{\omega_0^2 - n^2}} \right\}. \quad (23)$$

Для случая отсутствия сопротивления гребного винта при движении судна по инерции $F_0 = 0$. Тогда из (23) следует

$$T_{\max} \cong \frac{(ES)_b F_0 \cos \theta_0}{L \sqrt{\omega_0^2 - n^2}}. \quad (24)$$

Для случая $F_0 = 0$ и $n = 0$ получено

$$T_{\max} \cong \frac{(ES)_b F_0 \cos \theta_0}{L \omega_0} \left\{ 1 + \frac{\frac{v_0 \omega_0}{F_0} - n}{\sqrt{\omega_0^2 - n^2}} \right\} = \frac{(ES)_b v_0}{D} \sqrt{\frac{\Delta + \mu}{b}} = v_0 \sqrt{((\Delta + \mu)b)}, \quad (25)$$

что совпадает с (7).

Формулой (21) описывается динамика судна, а зависимостями (22)–(25) – динамическая сила в ваере.

Полная сила в ваере состоит из статического натяжения $T_{\text{СТ}}$ до зацепления и динамического, которое возникает после.

Заключение

Сформулирована математическая постановка задачи «мягкого зацепления» глубоководного трала за дно. Получено аналитическое решение задачи динамики системы ваер↔судно↔ваер. Выведена математическая зависимость для определения максимального динамического усилия натяжения ваера.

Список источников

1. Сухорукова С. В. Распределение объемов квот добычи (вылова) сельди тихоокеанской по пользователям в Северо-Охотоморской подзоне Дальневосточного рыбохозяйственного бассейна // Научные труды Дальрыбвтуза. 2025. Т. 73, № 3. С. 128–137.
2. О рыболовстве и сохранении водных ресурсов : Федеральный закон от 20 декабря 2004 г. № 166-ФЗ : Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс».
3. Красаускас Д. А., Еремеев Г. А., Недоступ А. А., Коновалова К. В., Насенков П. В. Исследование гидродинамики и формы тралового мешка / Д. А. Кара // Научные труды Дальрыбвтуза. 2026. Т. 75, № 1. С. 176–185.
4. Ражев, А. О. Инженерный расчёт разноглубинного рыболовного трала / А. О. Ражев, А. А. Недоступ // Вестн. Томского гос. ун-та. Математика и механика. 2023. № 81. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/inzhenernyy-raschet-raznoglubinnogo-rybolovnogo-trala> (дата обращения : 20.04.2026).
5. Рязанова Т. В. Методы модернизации рыболовного трала в условиях дефицита тяги судна в течение промыслового рейса // Вестник АГТУ. Серия : Морская техника и технология. 2021. № 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-modernizatsii-rybolovnogo-trala-v-usloviyah-defitsita-tyagi-sudna-v-techenie-promyslovogo-reysa> (дата обращения : 08.04.2026).
6. Недоступ А. А. Метод расчета силовых и геометрических характеристик донных тралов // Известия ТИНРО. 2011. Т. 164. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metod-rascheta-silovyh-i-geometricheskih-harakteristik-donnyh-tralov> (дата обращения : 02.04.2026).
7. Елчанинов, Е. В. Графический способ определения собственных частот главных форм колебаний по методу Релея / Е. В. Елчанинов, С. Н. Сикарев // Научные проблемы водного транспорта. 2006. № 16. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/graficheskiy-sposob-opredeleniya-sobstvennyh-chastot-glavnyh-form-kolebaniy-po-metodu-releya> (дата обращения : 24.04.2026).

Сведения об авторе

С. В. Терлыч – кандидат технических наук, декан факультета судовождения и судовой энергетики, SPIN-код: 3390-8260.

Information about the author

S. V. Terlych – PhD in Technical Sciences, Dean of the Faculty of Navigation and Ship Power Engineering, SPIN-code: 3390-8260.

Статья поступила в редакцию 28.04.2026; одобрена после рецензирования 12.05.2026; принята к публикации 26.05.2026.

The article was submitted 28.04.2026; approved after reviewing 12.05.2026; accepted for publication 26.05.2026.

© Терлыч С. В., 2026.

«Динамика системы «судно–глубоководный трал» при донном зацеплении трала» [Терлыч С. В.] распространяется под лицензией Creative Commons Attribution (CC BY 4.0).