

УДК 629.56

DOI: 10.37890/jwt.v77.441

## **Разработка математической модели буксировки подводных объектов, на основе однозвенных и двухзвенных стержневых моделей буксирных линий**

**М.С. Тищенко**

*ORCID: 0009-0006-2920-2898*

**Н.В. Ивановский**

*ORCID: 0009-0005-3823-4413*

*Керченский государственный морской технологический университет, г. Керчь, Россия*

**Аннотация:** В данной работе математическая модель буксировки подводных объектов разрабатывается на примере сложного промыслового комплекса «судно – ваер – трал» путем расчета его тягово-скоростных характеристик.

Параметры буксирной линии являются важным фактором при буксировке подводного объекта, поскольку она может повлиять на остойчивость и маневренность буксирующего судна. Если ваер слишком длинный, он может создать сильное сопротивление и затруднить движение судна. С другой стороны, если ваер слишком короткий, это может привести к слишком глубокому погружению буксируемого объекта и потенциальному повреждению объекта или буксирного оборудования. Следовательно, крайне важно выбрать подходящие параметры системы буксировки, исходя из размеров и массы буксируемого объекта, глубины хода и условий окружающей среды.

Исследованы существующие методы написания моделей систем буксир – объект буксировки, а именно методы базирующиеся на стационарном и нестационарном характере представления процесса выборки ваера.

В работе приведен сравнительный анализ однозвенных и двухзвенных стержневых моделей буксирных линий. Выявлены основные погрешности при построении траекторий движения буксируемых объектов, с использованием данных типов буксирных линий.

В частности, одним из результатов исследования является, построение модели системы «судно – ваер – буксируемый объект», которая имеет схожий показатель точности с более сложными двух и трехзвенными линиями.

**Ключевые слова:** математическая модель, буксируемый объект, стержневая модель, судно, ваер, трал, буксирная линия, ваерная лебедка.

## **Development of a mathematical model of underwater towing, based on single- and double-link rod models of towing lines**

**Maksim S. Tishchenko**

*ORCID: 0009-0006-2920-2898*

**Nikolai V. Ivanovskii**

*ORCID: 0009-0005-3823-4413*

*Kerch State Maritime Technological University, Russia*

**Abstract** This paper develops a mathematical model of underwater towing by the example of a complex fishing complex "vessel - vaer - trawl" by calculating its traction and speed characteristics.

The tow line is an important factor when towing an underwater object because it can affect the stability and maneuverability of the towing vessel. If the shaft is too long, it can create a

lot of drag and make it difficult to move the boat. On the other hand, if the shaft is too short, it may cause the towed object to sink too deeply and potentially damage the object or towing equipment. Consequently, it is critical to select the proper towing system settings based on the size and weight of the object being towed, the depth of the stroke, and the environmental conditions.

Existing methods for writing models of tug - towing object systems, namely, methods based on stationary and non-stationary nature of the vaer selection process are investigated.

The paper presents a comparative analysis of single-link and two-link rod models of towing lines. The main errors in the construction of trajectories of towed objects using these types of towing lines are revealed.

In particular, one of the results of the study is, building a model of the system "ship - vaer - towed object", which has a similar accuracy index to the more complex two- and three-link lines.

**Keywords:** mathematical model, towed object, rod model, vessel, vaer, trawl, towing line, shaft winch.

### **Введение**

Системы, включающие буксировку подводных объектов, обычно используются в океанографии, военно-морском флоте, промышленном рыболовстве и других областях. Важными компонентами комплекса «судно-буксируемый объект» являются судно-буксир, подъемная лебедка, гибкие соединения (канаты, тросы и ваера) и сами подводные объекты. Улучшение конструкции и производительности этих систем невозможно без использования математических моделей.

Подводные буксируемые объекты – устройства или оборудование, предназначенные для буксировки под водой за судном или другим подводным аппаратом. Эти объекты могут служить различным целям, таким как картографирование дна океана, проведение научных исследований, размещение подводных датчиков или камер, добычи гидробионтов. Примеры подводных буксируемых объектов включают буксируемые гидроакустические системы, орудия лова и дистанционно управляемые аппараты.

Параметры буксирной линии являются важным фактором при буксировке подводного объекта, поскольку она может повлиять на остойчивость и маневренность буксирующего судна. Если ваер слишком длинный, он может создать сильное сопротивление и затруднить движение судна. С другой стороны, если ваер слишком короткий, это может привести к слишком глубокому погружению буксируемого объекта и потенциальному повреждению объекта или буксирного оборудования. Следовательно, крайне важно выбрать подходящие параметры системы буксировки, исходя из размеров и массы буксируемого объекта, глубины хода и условий окружающей среды.

**Целью исследований** является построение математической модели системы «судно-буксирная линия-буксируемый объект».

**Объект исследования:** система «судно-буксирная линия-буксируемый объект»

**Предмет исследования:** параметры движения системы «судно-буксирная линия-буксируемый объект».

**Методы исследования.** Для реализации поставленной цели нами были использованы следующие методы исследования: анализ, формализация, моделирование.

Задача обеспечения управления буксировкой объекта по заданной траектории движения может быть сложной из-за различных факторов, таких как ветер, течение и волнение, которые могут влиять на параметры движения буксируемого объекта. Анализ результатов исследований подводных буксируемых систем как объектов

управления следует считать, что к основным задачам буксировки таких приборов относятся равномерность их движения в водном пространстве на заданной глубине.

В качестве примера рассмотрим построение математических моделей сложного комплекса «судно – ваер – трал». Вопросы механизации процессов промышленного рыболовства, разработки новых промысловых машин и научно обоснованных принципов формирования промысловых комплексов, промысловой и технической эксплуатации, надежности машин приобретают все большее значение как в практике рыболовства, так и при подготовке инженерных кадров в высших учебных заведениях [1–2].

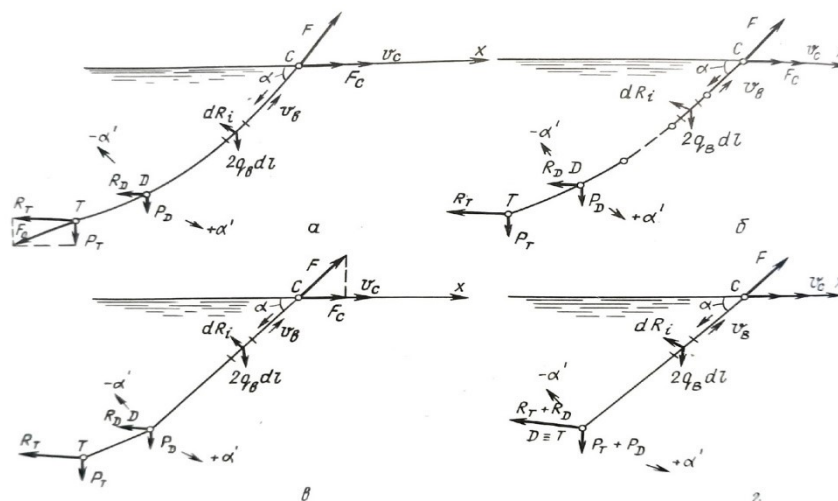


Рис. 1. Виды физических моделей системы судно – ваер – трал в режиме нестационарного движения:

а – тросовая маятниковая модель; б – многозвенная стержневая маятниковая модель; в – то же, двухзвенная; г – то же, однозвенная

Известно четыре вида физической модели системы судно – ваер – трал для решения задач тягово-скоростного взаимодействия между судном, ваерной лебедкой и тралом (рис.1) Наиболее адекватной является тросовая маятниковая модель (рис 1 а), в которой судно, траловые доски и трал заменены материальными точками С, D и Т, которые связаны между собой весомой идеально гибкой нитью (тросом). Точка С (центр судна) движется вдоль оси  $x$  со скоростью  $v_c$  а длина нити  $l$  связывающей точки С и D, изменяется со скоростью  $v_b$ . Силы веса точек D и Т равны соответственно  $P_d$  и  $P_T$ , а их силы гидродинамического сопротивления  $R_d$  и  $R_T$ . Сила веса единицы длины нити  $q$ , сопротивление участка длиной  $dl$  равно  $dR_i$ . Нагрузка в верхней точке нити (на подвесном ваерном блоке) равна  $F$ .

Аналогом тросовой маятниковой модели является многозвенная стержневая маятниковая модель (рис. 1, б), в которой трос (нить) заменен достаточно большим количеством жестких шарнирно соединенных между собой стержней, весовые ( $q$ ) и гидродинамические ( $dR_i$ ) характеристики которых аналогичны тросу [3].

Более грубым аналогом является двухзвенная стержневая маятниковая модель (рис. 1, в). Еще более грубым – однозвенная стержневая маятниковая модель (рис. 1, г).

Конечно, интересен вопрос о правомерности замены ваера прямолинейным стержнем (или нитью). Вполне очевидно, что для донных тралов при глубине траления до 500 м криволинейность формы ваера весьма существенна. При буксировке же современных разноглубинных тралов, как показывают результаты

натурных морских исследований, форма ваера практически прямолинейная, а коэффициент пропорциональности между хордой, соединяющей точки С и D, и длиной ваера равен  $0,92 \div 0,98$ . Одновременно необходимо учесть, что по нагрузке на лебедку разноглубинный трал является наиболее представительным. Кроме того, при выборке донного трала после отрыва досок от грунта расчетная схема сил, действующих па ваер. ничем не отличается от таковой для разноглубинного трала.

Все существующие методы расчета нагрузки  $F$  при выборке (травлении) ваера можно классифицировать на две группы. К первой группе следует отнести все методы, которые базируются на стационарном или квазистационарном характере представления процесса выборки ваера. Среди этой группы методов наиболее разработанными являются метод Ш. А. Расулева, С. С. Торбана и Г. А. Траубенберга [4–5] и метод В. П. Карпенко, С. С. Торбана.[6] Ко второй группе следует отнести методы, которые базируются на нестационарном характере представления процесса выборки ваера. Это методы Б. А. Альтшуля, А. Фишера (ГДР) [7] и В П Карпенко.

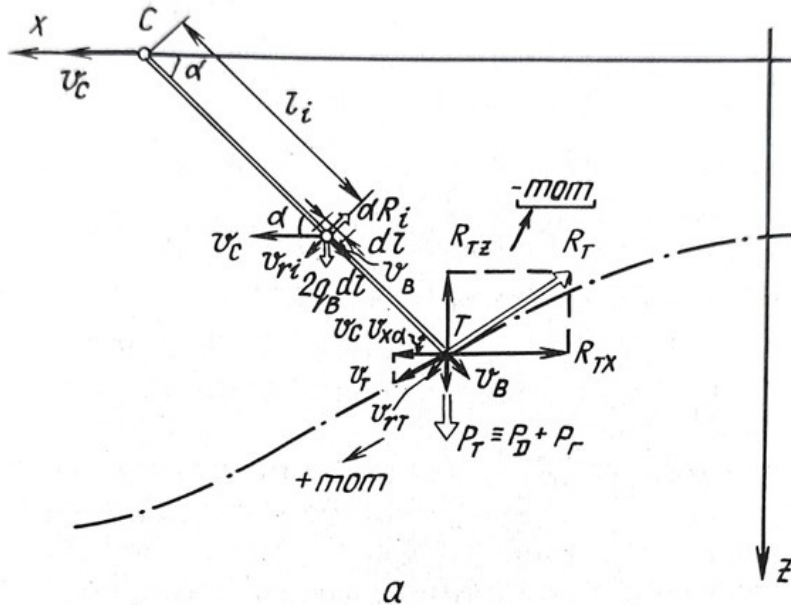
В работах А. Фишера и В. П. Карпенко построение уравнения движения системы судно трал основывается на использовании теоремы об изменении момента количества движения траловой системы, а в работах Б. А. Альтшуля для этих целей использованы уравнения Лагранжа второго рода.

Физический смысл и математическую сущность метода определения нестационарного движения системы судно трал рассмотрим на примере использования для этих целей теоремы об изменении момента количества движения траловой системы [8]. Для однозвенной модели системы судно – трал (рис. 2) имеем:

- вертикальная плоскость (1),
- горизонтальная плоскость (2).

$$\frac{dK_y}{dt} = mom_y \left\{ P_T; R_T; \sum_{i=1}^n dR_i; \sum_{i=1}^n 2q_b dl; \right\} \quad (1)$$

$$\frac{dK_z}{dt} = mom_z \left\{ R_T; \sum_{i=1}^n dR_i \right\} \quad (2)$$



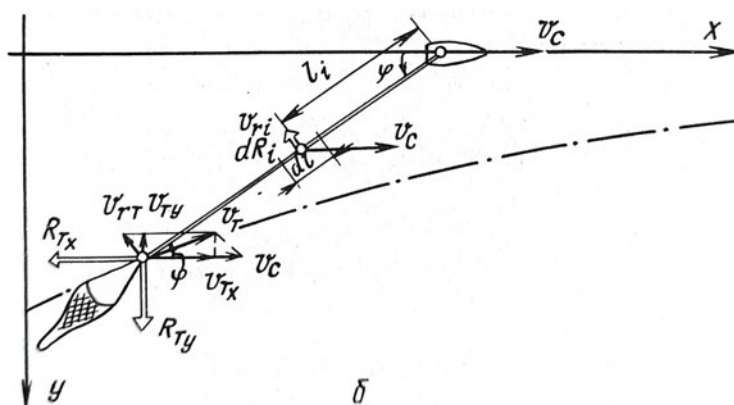


Рис. 2. Схематизация системы судно – трал:  
 а – вертикальная плоскость, б – горизонтальная плоскость.

Подставляя полученные выражения для момента количеств движения и суммарного момента внешних сил системы ваер– трал в исходное дифференциальное уравнение (1), после соответствующих преобразований получим окончательно дифференциальное уравнение углового вращения линии судно – трал в вертикальной плоскости

$$\frac{d^2 K_y}{dt^2} + a_1(a, t) \left(\frac{da}{dt}\right)^2 + a_2(a, t) \frac{da}{dt} + a_3(a, t) = 0,$$

По аналогичной схеме можно получить выражения для момента количеств движения и суммарного момента внешних сил системы ваер – трал в горизонтальной плоскости, подставляя которые в исходное дифференциальное уравнение (2) выполнив соответствующие преобразования, можно получить дифференциальное уравнение углового вращения линии судно – трал в горизонтальной плоскости

$$\frac{d^2 \varphi}{dt^2} + b_1(\varphi, t) \left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 + b_2(\varphi, t) \frac{d\varphi}{dt} + b_3(\varphi, t) = 0,$$

Наибольшую разработку, проверку и отладку получила модель Б. А. Альтшуля. Она имеет наибольшее число структурных модификаций и постановок задач ее решения. Для наших целей, предусматривающих главным образом связь тягового усилия ваерной лебедки с параметрами траловой системы и судна, интерес представляет модификация задачи определения закона изменения тягово-скоростных параметров выборки ваера для заданной траловой системы, когда скорость ее движения  $v_T$  относительно воды должна быть постоянной и равной скорости траления  $v_{Tr}$  (с целью сохранения улова в трале), а скорость хода судна  $v_c$  и параметры его качки  $\dot{z}_c$  и  $\ddot{z}_c$  изменяются по заданному закону[9].

При такой постановке задачи положение системы судно -ваерная лебедка – ваер – трал (рис. 3) описывается следующей системой дифференциальных уравнений второго порядка (3):

$$\left\{ \begin{aligned}
 & \left( m_D + \frac{1}{2} m_T + \frac{1}{3} m_i l_0 \right) l \ddot{a}_1 + \left( m_D + \frac{1}{2} m_T + \right. \\
 & \left. + \frac{1}{2} m_i l \right) \dot{z}_c \cos a_1 = \left( P_D + \frac{1}{2} P_T + \frac{1}{3} q_B l \right) \cos a_1 - \\
 & - \frac{1}{2} c_0 \rho d_B l \left[ \frac{1}{4} l^2 \ddot{a}_1^2 + \frac{2}{3} l \dot{a}_1 (\dot{z}_c \cos a_1 + \dot{x}_c \sin a_1)^2 \right] - \\
 & - \frac{R_D + 0,5 R_T}{v_T} [\dot{x}_c \sin a_1 + l \dot{a}_1 + \dot{z}_c \cos a_1 + \\
 & \quad + l_K \dot{a}_2 \cos(a_1 - a_2)]; \\
 & \frac{1}{2} m_T (\dot{z}_c \cos a_2 + l_K \dot{a}_2) = \frac{1}{2} P_T \cos a_2 - \\
 & - \frac{R_T}{2 v_T} [\dot{x}_c \sin a_2 + \dot{z}_c \cos a_2 + l \dot{a}_1 + l_K \dot{a}_2 + \\
 & \quad + l \sin(a_1 - a_2)]; \\
 & \dot{l} = \dot{x}_c \sin a_1 - \dot{z}_c \sin a_1 - l_K \dot{a}_2 \sin(a_1 - a_2) - \\
 & - \sqrt{v_T^2 - [\dot{x}_c \sin a_1 + \dot{z}_c \cos a_1 + l \dot{a}_1 + l_K \dot{a}_2 \cos(a_1 - a_2)]^2},
 \end{aligned} \right. \quad (3)$$

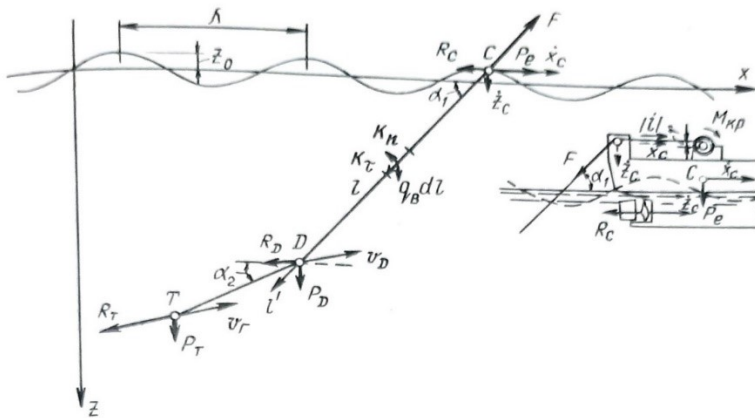


Рис. 3. Физическая модель тягово-кинематического взаимодействия системы судно – ваерная лебедка – ваер – трал при выборке трала:  
 С — центр масс судна; D — центр масс траловых досок;  
 Т — центр масс трала

где  $l_0 l$  — соответственно начальная и текущая длина ваера, м;  $\dot{z}_c, \ddot{z}_c$  — соответственно вертикальная составляющая скорости и ускорения перемещения (качки) центра масс судна (м/с, м/с<sup>2</sup>);  $\dot{x}_c, \ddot{x}_c$  — горизонтальная составляющая скорости и ускорения центра масс судна (м/с, м/с<sup>2</sup>);  $a_1, \dot{a}_1, \ddot{a}_1$  — угловое положение линии ваера, скорость и ускорение ее вращения относительно центра масс судна;  $a_2, \dot{a}_2, \ddot{a}_2$  — соответственно угловое положение линии кабеля, скорость и ускорение ее вращения относительно точки D (центр масс траловых досок)[10].

Начальные условия для  $z_c, \dot{z}_c$ , принимаем нулевыми, так как определить их в эксплуатационных условиях с необходимой точностью не представляется возможным, но в связи с тем, что система устойчива это существенно не влияет на результат решения. Начальные параметры скорости и ускорения центра масс судна берутся с судового лага. Особую сложность, с технической точки зрения представляет процесс определение параметров углового положения линии ваера  $a_1, \dot{a}_1$ . В процессе моделирования  $a_1$  принимали равное 15° (наиболее вероятное положение ваера в

начале траления), с нулевым начальным ускорением. Для измерения этих параметров в экспериментальных условиях требуется разработать дополнительное оборудование что является одной из задач дальнейших исследований.

### Результаты исследования

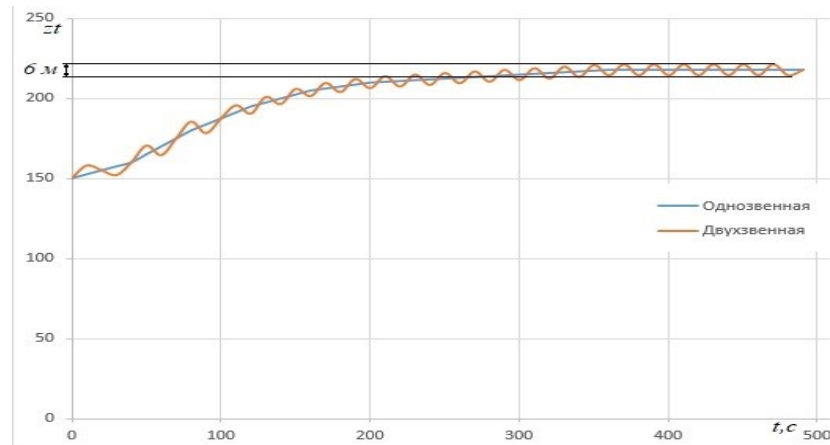


Рис. 4. Переходный процесс изменения глубины хода трала при изменении скорости хода судна

На графике (рис. 4) приведены результаты численного решения дифференциального уравнения однозвенной и двухзвенной стержневой модели углового вращения линии судно – трал и определения кинематических параметров движения трала в вертикальной плоскости, при следующих технических характеристиках траловой системы:

$$l = 500\text{ м}; P_T = 40\text{ кН}; q_B = 22\text{ Н/м}; K_T = 25 \frac{\text{кН с}^2}{\text{м}^2}; K_B = 2 \frac{\text{Н с}^2}{\text{м}^3}; g = 9,81\text{ м/с}^2.$$

Анализ переходного процесса (см. рис. 4) движения траловой системы в вертикальной плоскости указывает прежде всего на ее существенную инерционность, на большую длительность переходов трала с горизонта на горизонт при изменении скорости хода судна, а кроме того, на схожий показатель точности равный 3%

### Заключение

В работе приведен сравнительный анализ однозвенных и двухзвенных стержневых моделей буксирных линий. Выявлены основные погрешности при построении траекторий движения буксируемых объектов, с использованием данных типов буксирных линий.

В результате нашего исследования, были уточнены параметры однозвенной модели системы «судно – ваер – буксируемый объект», которая имеет показатель точности в 3% с более сложной двухзвенной стержневой маятниковой моделью.

### Список литературы

1. Ивановская, А. В. Принципы моделирования привода судового грузоподъемного оборудования / А. В. Ивановская // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. – 2023. – № 1. – С. 65-72. – DOI 10.26296/2619-0605.2023.1.1.005. – EDN NPMORQ.

2. Ивановская, А. В. Особенности динамического анализа тяговой системы с конечным натяжением / А. В. Ивановская // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. – 2022. – № 1. – С. 37-46. – DOI 10.47404/2619-0605\_2022\_1\_37. – EDN XYFIEM.
3. Математическое обеспечение и аппаратная реализация задач управления комплексом "рыбопромышленное судно-орудия лова" / В В Антипов, В Ю Бобрович, В К Болховитинов, А А Болисов // Морской вестник. – 2011. – № 4(40). – С. 45-49. – EDN OJCZPJ.
4. Определение параметров ваерных лебедок: Метод. указания / М-во рыб. хоз-ва СССР, ВНИИ мор. раб. хоз-ва и океанографии; [Сост. Ш.А. Расулевым и др.]. - М: ВНИРО, 1981. - 39 с.: граф.; 20 см.
5. Методика выбора основных параметров ваерных лебедок и режимы эксплуатации траловой системы / Г. А. Траубенберг, С. С. Торбан, Ш. А. Расулев. - Л., 1978. - (Доклад; № 2.17)
6. Карпенко В. П. Механизация и автоматизация процессов промышленного рыболовства: учебное пособие / В.П. Карпенко, С.С. Торбан. – М.: Агропромиздат, 1990. – 464 с.
7. Динамика траловой системы / Б. А. Альтшуль, А. Л. Фридман. - Москва: Агропромиздат, 1990. - 237,[3] с. : ил.; 22 см.; ISBN 5-10-001207-2 (В пер.) : 3 р. 50 к.
8. Савотин, Д. В. Пространственное моделирование траловой системы при стационарном движении / Д. В. Савотин // Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промышленное и техническое использование : Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции, Петропавловск-Камчатский, 24–26 марта 2015 года. Том Часть II. – Петропавловск-Камчатский: Камчатский государственный технический университет, 2015. – С. 63-69. – EDN UDHVGR.
9. Наумов, В. А. Моделирование гибких связей в системах буксировки подводных объектов / В. А. Наумов // Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем (ИКМ МТМТС-2019): Пятая международная научно-практическая конференция. Труды конференции, Санкт-Петербург, 10 июля 2019 года. – Санкт-Петербург: Издательство "Перо", 2019. – С. 119-123. – EDN VVFAHY.
10. Математические моделирование элементов тралового комплекса / С. П. Голиков, Н. В. Ивановский, С. Г. Черный [и др.] // Водный транспорт. – 2013. – № 2(17). – С. 181-190. – EDN SCKWJX.

#### References

1. Ivanovskaya A. V. Principles of modeling the drive of shipboard lifting equipment / A. V. Ivanovskaya // Bulletin of Kerch State Marine Technological University. - 2023. - № 1. - С. 65-72. - DOI 10.26296/2619-0605.2023.1.1.005. - EDN NPMORQ.
2. Ivanovskaya A. V. Features of dynamic analysis of traction system with finite tension / A. V. Ivanovskaya // Bulletin of Kerch State Marine Technological University. - 2022. - № 1. - С. 37-46. - DOI 10.47404/2619-0605\_2022\_1\_37. - EDN XYFIEM.
3. Mathematical support and hardware implementation of the control tasks of the complex "fishing vessel - fishing gear" / V. Antipov, V. Bobrovich, V. Bolkhovitinov, A. Bolisov // Morskoi Vestnik. - 2011. - № 4(40). - С. 45-49. - EDN OJCZPJ.
4. Karpenko, V.P., Torban, S.S. Mechanization and automation of industrial fishery processes. M.: Ag-ropromizdat, 1990.
5. Dynamics of trawl system / B.A. Altshul, A.L. Friedman. - Moscow : Agropromizdat, 1990. - 237,[3] с. Ill; 22 cm.; ISBN 5-10-001207-2 (In per.) : 3 p. 50 к.
6. Determination of parameters of boat winches: Methodical instructions / Ministry of Fishery of the USSR, All-Russian Institute of Marine Economy and Oceanography ; [Compiled by Sh.A.Rasulev et al.] - MOSCOW: VNIRO, 1981. - 39 с. : graph. ; 20 cm.
7. Methodology of main parameters selection of shaft winches and operation modes of trawl system / G.A. Traubenber, S.S. Torban, Sh.A. Rasulev. - Л., 1978. - (Report ; No.2.17)
8. Savotin, D. V. Spatial modeling of trawl system at stationary motion / D. V. Savotin // Natural resources, their current state, protection, commercial and technical use : Proceedings of VI All-Russian Scientific and Practical Conference, Petropavlovsk-Kamchatsky, 24-26



March 2015. Volume Part II. - Petropavlovsk-Kamchatsky: Kamchatka State Technical University, 2015. - С. 63-69. - EDN UDHVGR.

9. Naumov, V. A. Modeling of flexible links in underwater towing systems / V. A. Naumov // Simulation and Integrated Modeling of Marine Equipment and Marine Transportation Systems (ICM MTMTS-2019) : Fifth international scientific and practical conference. Proceedings of the conference, St. Petersburg, July 10, 2019. - St. Petersburg: Pero Publishing House, 2019. - С. 119-123. - EDN VVFAHY.
10. Mathematical modeling of trawl complex elements / S. P. Golikov, N. V. Ivanovskii, S. G. Cherny [et al.] // Vodnyi transport. - 2013. - № 2(17). - С. 181-190. - EDN SCKWJX.

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Тищенко Максим Сергеевич**, ассистент кафедры судовождения и промышленного рыболовства «Керченский государственный морской технологический университет» (ФГБОУ ВО «КГМТУ»), 298309, Российская Федерация, Керчь, ул. Орджоникидзе, 82, e-mail; masa.33@mail.ru

**Maksim S. Tishchenko**, professor assistant of Department of Navigation and Industrial Fishing, Kerch State Maritime Technological University, 82 Ordzhonykydze Str., Kerch, 298309, Russian Federation, e-mail: masa.33@mail.ru

**Ивановский Николай Владимирович**, к.т.н., доцент, доцент кафедры судовождения и промышленного рыболовства «Керченский государственный морской технологический университет» (ФГБОУ ВО «КГМТУ»), 298309, Российская Федерация, Керчь, ул. Орджоникидзе, 82 inv8@mail.ru

**Nikolai V. Ivanovskii**, PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Navigation and Industrial Fishing, Kerch State Maritime Technological University, 82 Ordzhonykydze Str., Kerch, 298309, Russian Federation, e-mail: inv8@mail.ru

Статья поступила в редакцию 21.06.2023; опубликована онлайн 20.12.2023.  
Received 21.06.2023; published online 20.12.2023.