

Научная статья
УДК 66.012, 621.337.1, 004.032.26
<https://doi.org/10.24143/2073-5529-2024-4-125-135>
EDN YKBIWV

Уравнения, описывающие процессы эксплуатации траловых комплексов

*Александр Алексеевич Недоступ[✉], Алексей Олегович Ражев,
Павел Владимирович Насенков, Егор Ильич Сергеев*

*Калининградский государственный технический университет,
Калининград, Россия, nedostup@klgtu.ru[✉]*

Аннотация. Изучение глубоководных ресурсов является важным шагом в направлении устойчивого и рационального использования морских богатств. Исследования могут включать в себя анализ биологического многообразия, характеристик экосистем, а также технологий и методов промысловой деятельности в глубоководных условиях. Исследования в этой области предоставляют уникальные возможности углубленного понимания морской экосистемы для развития рыболовства в глубоководных районах. Это, в свою очередь, способствует укреплению устойчивости и конкурентоспособности рыбохозяйственного комплекса России в долгосрочной перспективе. В Российской Федерации приоритетом является проведение научных исследований в области изучения глубоководного промысла, направленных как на развитие промысла глубоководных объектов, так и на их изучение в целях переработки для фармацевтической промышленности. Разработка инновационных методов лова мезопелагических рыб и глубоководных гидробионтов является важной задачей научного сообщества Российской Федерации. Рассматриваются уравнения, предназначенные для описания разнообразных процессов, которые протекают при эксплуатации донных и разноглубинных траловых комплексов. Сложности решения приведенных уравнений указывают на целесообразность разделения процессов эксплуатации на микроуровень, макроуровень и метаяуровень. Теория мультифизического подобия позволяет моделировать процессы на различных уровнях. Приводятся компьютерные программы, позволяющие пересчитывать результаты модельных экспериментов с модели тралового комплекса на натурный траловый комплекс.

Ключевые слова: уравнение, процесс эксплуатации, траловый комплекс, компьютерная программа

Благодарности: исследование проведено в рамках выполнения государственного задания по теме «Разработка физических, математических и предсказательных моделей процессов эксплуатации донного и разноглубинного траловых комплексов».

Для цитирования: Недоступ А. А., Ражев А. О., Насенков П. В., Сергеев Е. И. Уравнения, описывающие процессы эксплуатации траловых комплексов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2024. № 4. С. 125–135. <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2024-4-125-135>. EDN YKBIWV.

Original article

Equations describing trawl complexes operation processes

Alexander A. Nedostup[✉], Alexey O. Razhev, Pavel V. Nasenkov, Egor I. Sergeev

*Kaliningrad State Technical University,
Kaliningrad, Russia, nedostup@klgtu.ru[✉]*

Abstract. Exploring deep-sea resources is an important step towards sustainable and efficient use of marine resources. Research may include analysis of biodiversity, ecosystem characteristics, and deep-sea fishing technologies and practices. Research in this area provides unique opportunities to advance understanding of the marine ecosystem for the development of deep-sea fisheries. This, in turn, helps to strengthen the sustainability and competitiveness of the Russian fishery complex in the long term. In the Russian Federation, the priority is to conduct scientific research in the field of deep-sea fishing, aimed both at developing the fishing of deep-sea objects and at studying them for the purpose of processing for the pharmaceutical industry. The development of innovative methods for catching mesopelagic fish and deep-sea aquatic organisms is an important task for the scientific community of the Russian Federation. The

equations designed to describe various processes that occur during the operation of bottom and mid-depth trawl systems are discussed. The complexity of solving the above equations indicates the advisability of dividing exploitation processes into micro-level, macro-level and meta-level. The theory of multiphysics similarity allows you to simulate processes at various levels. Computer programs are presented that make it possible to recalculate the results of model experiments from a model of a trawl complex to a full-scale trawl complex.

Keywords: equation, operation process, trawl complex, computer program

Acknowledgment: the research was carried out within the framework of the state task on the topic “Development of physical, mathematical and predictive models of the processes of operation of bottom and multi-depth trawl complexes”.

For citation: Nedostup A. A., Razhev A. O., Nasenkov P. V., Sergeev E. I. Equations describing trawl complexes operation processes. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing industry.* 2024;4:125-135. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2024-4-125-135>. EDN YKBIWV.

Введение

Для проведения экспериментальных испытаний и последующего пересчета результатов на модельный объект необходимо учитывать закономерности, которые были установлены теорией подобия. Это является важным аспектом в области промышленного рыболовства и судостроения [1]. Теория подобия заключается в методе научного обобщения результатов эксперимента. С применением данной теории появляется возможность проведения опытов на значительно меньших моделях, при этом исключается использование жестких физических явлений. В основе методов теории подобия лежат процессы масштабирования и моделирования процессов.

Теория подобия показывает, как следует проводить эксперименты и обрабатывать экспериментальные данные, а ограничившись минимальным числом опытов, можно обобщить результаты и получить закономерности изменения параметров для целых групп сходных явлений. Теории подобия позволяют изучать сложные процессы с достаточной для практики точностью, используя модели, которые значительно меньше их естественных размеров и зачастую проще. Они упрощают и удешевляют эксперименты.

В настоящее время теория подобия в области промышленного рыболовства является одной из самых больших научных дисциплин, которая занимается не только изучением вопросов сходства различных явлений и процессов, но и может с помощью анализа размерностей величин получать (с точностью до постоянной величины масштаба сходства) зависимости, которые характеризуют те или иные явления [2, 3]. Применительно к моделированию тралового комплекса возникают задачи выявления условий, обеспечивающих возможность пересчета результатов с модели на натуре, установления правил пересчета параметров, характеризующих механические, гидродинамические, грунтодинамические и другие процессы тралового лова.

Применение теории подобия к траловым комплексам необходимо:

– для аналитического выявления зависимостей и связей, а также решения конкретных задач (напри-

мер, составления графиков работы системы управления, боковых течений, штормов);

– работы с результатами экспериментальных исследований и испытаний тралового флота, когда результаты выражаются в обобщенных уравнениях;

– создания моделей траловых комплексов, воспроизводящих явления и процесс так же, как и полномасштабные траловые комплексы.

Данный подход позволяет углубленно исследовать различные аспекты работы траловых систем, от механики и гидродинамики до электродинамики и оптики, обеспечивая более полное понимание их работы и эффективности в различных условиях эксплуатации.

Цель и задачи исследования

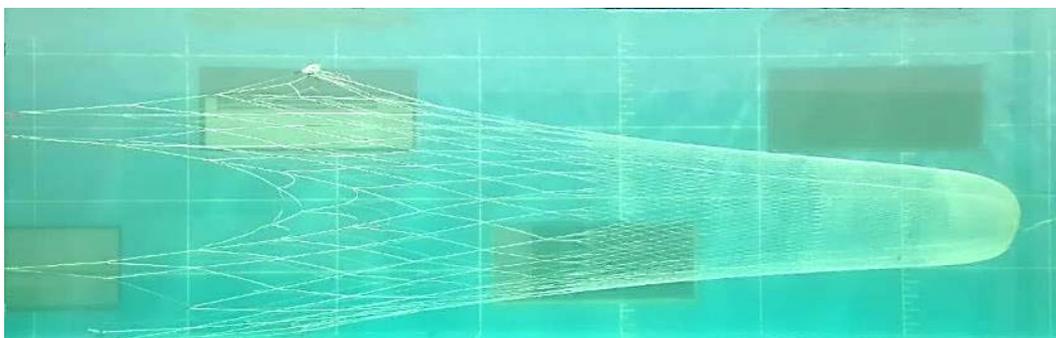
Согласно принятой Правительством Российской Федерации Стратегии развития рыбохозяйственного комплекса Российской Федерации до 2030 г., исследования должны быть направлены на изучение глубоководных объектов добычи. Стратегия ориентирована как на совершенствование промысла глубоководных объектов, так и на их изучение с целью дальнейшей переработки в целях получения лекарственных препаратов. Разработка инновационных способов лова мезопелагических рыб и глубоководных гидробионтов – одна из главных задач, поставленная перед научным сообществом России.

Изучение глубоководных ресурсов является важным шагом в направлении устойчивого и рационального использования морских богатств. Исследования могут включать в себя анализ биологического многообразия, характеристик экосистем, а также технологий и методов промысловой деятельности в глубоководных условиях. Исследования в этой области предоставляют уникальные возможности для углубленного понимания морской экосистемы в рамках развития рыболовства в глубоководных районах. Это, в свою очередь, способствует укреплению устойчивости и конкурентоспособности рыбохозяйственного комплекса России в долгосрочной перспективе.

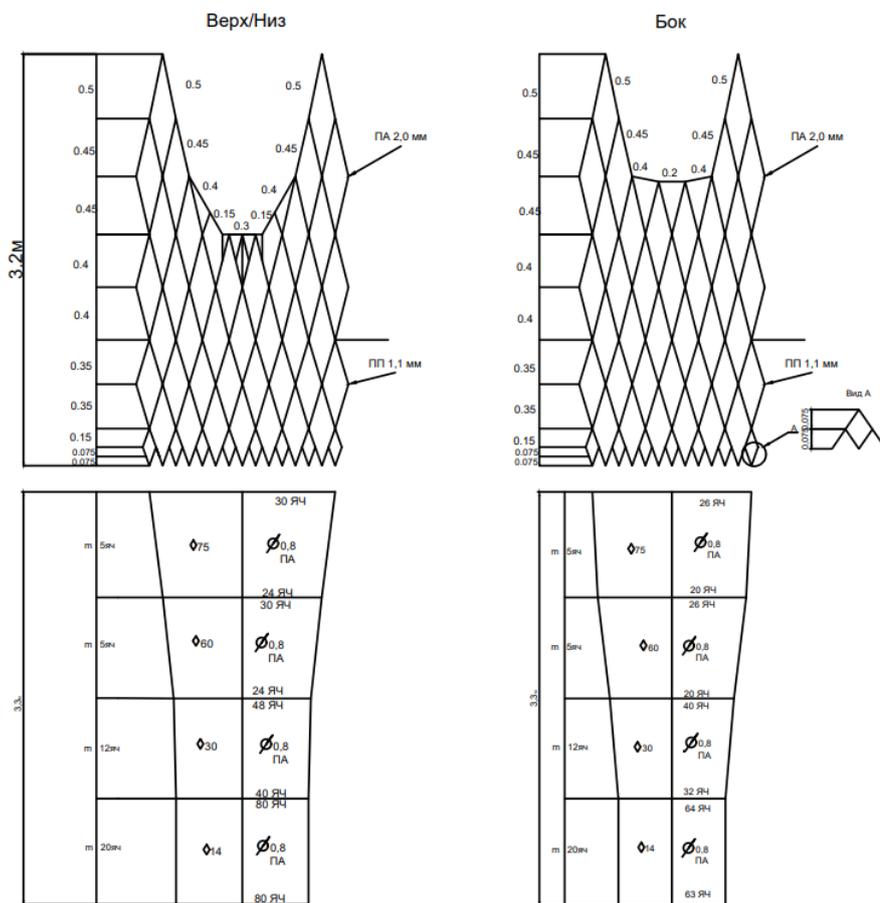
Цель настоящего научного исследования заключается в разработке правил планирования и проведения экспериментальных исследований моделей

траловых комплексов на опытных установках (к примеру, гидроканал ОАО «МариНПО» – ООО «Фишеринг Сервис»), минимизации величины масштабного эффекта. На рис. 1, 2 представлены модели разноглубинного трала для лова ряпушки (*Coregonus albula*) в оз. Виштынецкое Калининград-

ской области N-MWT-m1 3,3/12,0 м, N-MWT-m2 1,65/6,0 м и их чертежи, созданные на основе правил мультифизического подобия тралового комплекса [3] и компьютерной программы «Система автоматизированного проектирования орудий промышленного рыболовства» [4–6].



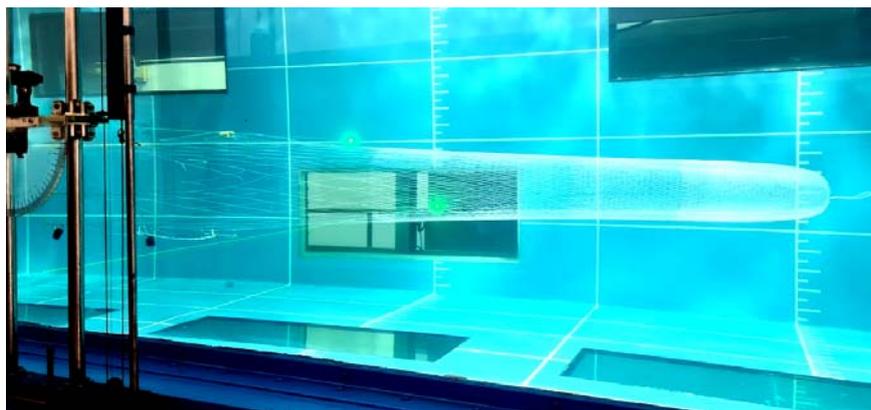
a



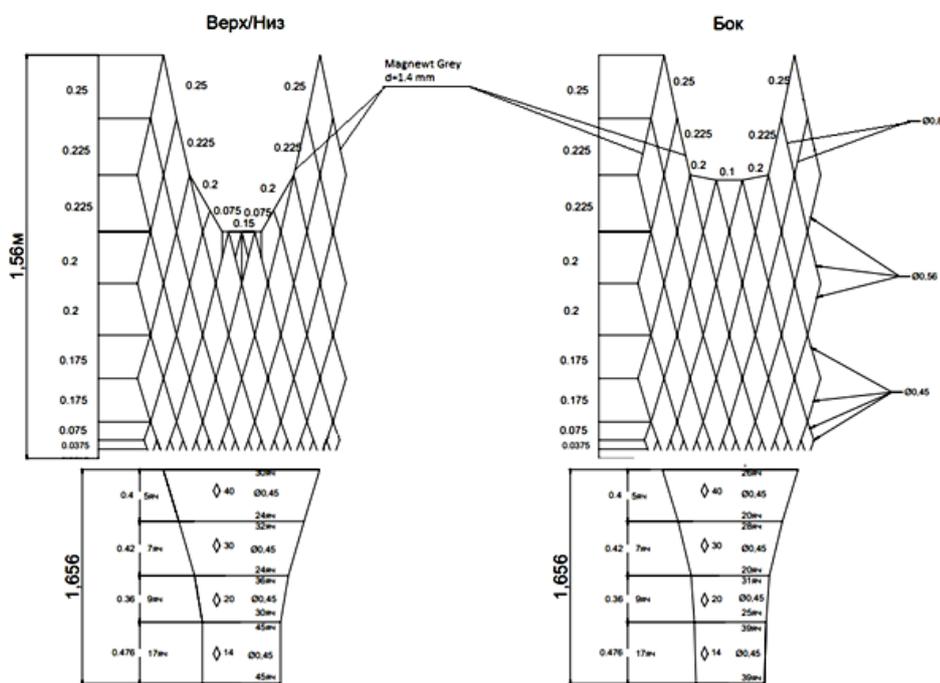
б

Рис. 1. Модель разноглубинного трала N-MWT-m1 3,3/12,0 м:
a – модель трала в потоке; *б* – чертеж модели трала

Fig. 1. Model of a multi-depth trawl N-MWT-m1 3.3/12.0 m:
a – model of a trawl in a stream; *б* – drawing of a trawl model



а



б

Рис. 2. Модель разноглубинного трала N-MWT-m2 1,65/6,0 м:
а – модель трала в потоке; б – чертеж модели трала

Fig. 2. Model of a multi-depth trawl N-MWT-m2 1.65/6.0 m:
а – model of a trawl in a stream; б – drawing of a trawl model

К задачам исследования относится вывод уравнений, описывающих процессы эксплуатации траловых комплексов (донного и разноглубинного).

Представленное в данной статье научное исследование направлено на композицию мультифизического моделирования различных по природе процессов, происходящих в системе «судно-трал» или траловом комплексе, в целях создания более точных, надежных и эффективных траловых систем, способных эффективно функционировать в разнообразных морских условиях и обеспечивать устойчивое и ра-

циональное использование морских ресурсов.

Материалы и методы

Рассмотрим уравнения, описывающие процессы эксплуатации тралового комплекса. Запишем уравнения, определяющие механические движения тралового комплекса и его элементов, движение потока водных масс у тралового комплекса, грунтодинамический процесс движения элементов тралового комплекса (траловой доски и грунттропа донного трала), трение трала о поверхность слипа рыболов-

ного судна и трение трала о поверхность тралового барабана и между канатно-сетными элементами трала, процесс электродинамики промысловых механизмов лебедок, температурное взаимодействие тралового комплекса и среды, освещенность процесса эксплуатации тралового комплекса и его видимость под водой, распространение звуковой волны от колебаний канатных элементов и др.

Рассмотрим уравнения, описывающие основные процессы, протекающие в траловых комплексах.

1. Уравнения механического движения тралового комплекса и его элементов (постановка и выборка трала). Используя уравнения движения системы трала, опускаемого или поднимаемого лебедкой, добавим крутящий момент к ротору двигателя траловой лебедки [7]:

$$m \frac{dv_T}{dt} = 2T_b - mg(1 - \lambda) - \frac{1}{2} c_x \rho v_T^2 F_n - k \lambda m \frac{dv_T}{dt}, \quad (1)$$

где m – масса траловой системы с уловом; v_T – скорость движения трала; t – время; T_b – сила натяжения в ваере; g – ускорение свободного падения; λ – отношение плотности воды к плотности траловой системы; c_x – коэффициент гидродинамического сопротивления траловой системы; ρ –

плотность воды; F_n – площадь канатно-сетной части трала с траловыми досками; k – коэффициент присоединенных масс.

2. Уравнения гидродинамики движения тралового комплекса и его элементов (постановка, траление и выборка трала). Независимо от формы трала поток воды описывается системой из двух уравнений: неразрывности и движения:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{v}) = 0; \quad (2)$$

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla \vec{v}) \right] = \rho (\vec{R} + \vec{Q}) - \text{grad } p + \mu \nabla^2 \vec{v},$$

где v – модуль скорости потока воды относительно элементов тралового комплекса; \vec{v} – вектор скорости потока воды относительно элементов тралового комплекса; \vec{R} – вектор гидродинамической силы сопротивления; \vec{Q} – вектор гидростатической силы; p – давление воды; μ – динамическая вязкость воды.

3. Уравнения грунтодинамического движения тралового комплекса и его элементов (движение траловых досок и грунттропа донного трала):

$$d \left(\frac{F_d}{q_d l_d} \right) = \frac{\partial \left(\frac{F_d}{q_d l_d} \right)}{\partial \left(\frac{q_d}{d_d} \right)} d \left(\frac{q_d}{d_d} \right) + \frac{\partial \left(\frac{F_d}{q_d l_d} \right)}{\partial \vec{v}} d \vec{v} + \frac{\partial \left(\frac{F_d}{q_d l_d} \right)}{\partial (90^\circ - \beta)} d (90^\circ - \beta) +$$

$$\left. \begin{aligned} & \left(\frac{\partial^2 \left(\frac{F_d}{q_d l_d} \right)}{\partial \left(\frac{q_d}{d_d} \right) \partial \vec{v}} + \frac{\partial^2 \left(\frac{F_d}{q_d l_d} \right)}{\partial \left(\frac{q_d}{d_d} \right) \partial (90^\circ - \beta)} \right) d \left(\frac{q_d}{d_d} \right), \\ & \left(\frac{\partial^2 \left(\frac{F_d}{q_d l_d} \right)}{\partial \left(\frac{q_d}{d_d} \right) \partial \xi} \right) d \xi \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $F_d = F_{xc}$ – динамическая сила трения грунттропа; q_d – вес одного метра грунттропа; l_d – длина грунттропа; d_d – диаметр бобинца грунттропа (катушек, каната); β – угол поворота грунттропа к вектору движения траловой системы; ξ – коэффициент укрута грунттропа (при условии, что грунттроп состоит их крученного каната).

4. Уравнения, характеризующие работу двигателя постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ НВ), описывают электромеханическую систему, управляемую регулируемым электрическим приводом.

Исходные уравнения динамики системы ДПТ НВ [7]:

$$\begin{cases} J \frac{d\Omega}{dt} = cI - M_c; \\ L \frac{dI}{dt} = U_d - c\Omega - IR_{\text{я}}, \end{cases} \quad (4)$$

где J – момент инерции ротора; Ω – угловая скорость вращения ротора; c – коэффициент электродвижущей силы; I – сила тока; M_c – крутящий момент ротора; L – индуктивность; U_d – напряжение на якоре; $R_{\text{я}}$ – электрическое сопротивление цепи якоря.

Одновременно осуществляется рассмотрение трибологического процесса на барабане (промысловая схема имеет фрикционный барабан), на ко-

торый набирается трал. Математическое описание динамики вращения барабана, движения траловой системы с уловом без проскальзывания и движения

$$J_1 \frac{d\omega}{dt} = M_6 - \operatorname{sgn}\left(\omega \frac{D}{2} - v_6\right) F_{\text{тр}} \frac{D}{2}; \frac{d\psi}{dt} = \omega; \psi(0) = 0; \omega(0) = 0, \quad (5)$$

$$v_6 = \frac{\omega D}{2}; \frac{dL_1}{dt} = -v_6; L_1(0) = L_0; \quad (6)$$

$$m \frac{dv}{dt} = \operatorname{sgn}\left(\omega \frac{D}{2} - v_6\right) F_{\text{тр}} - S_1 + S_2; \frac{dL_1}{dt} = -v_6; L_1(0) = L_0; v_6(0) = 0, \quad (7)$$

где J_1 – момент (приведенный) инерции вала с барабаном и траловой системы; ω – угловая скорость вращения барабана; M_6 – вращающий момент, приложенный к валу; D – диаметр барабана; v_6 – линейная скорость движения точки поверхности барабана; $F_{\text{тр}}$ – сила трения фрикционного взаимодействия с поверхностью барабана; ψ – угол поворота вала; L_1 – длина набегающей ветви траловой системы; L_0 – длина набегающей ветви траловой системы в начале моделирования; S_1 – натяжение в набегающей ветви траловой системы в точке касания барабана; S_2 – натяжение в сбегающей ветви траловой системы в точке отрыва от барабана.

Таким образом, уравнения электромеханической системы и трибологического процесса представляют комплексный аппарат для анализа и моделирования рыболовных операций, обеспечивая более полное понимание физических взаимодействий в данной области.

Крутящий момент ротора двигателя M_c в электромеханической системе регулируемого электрического привода зависит от разнообразных факторов, таких как конструкция барабана, характеристики используемого двигателя, а также параметры системы управления. Данная зависимость отражает важные аспекты работы электромеханической системы, позволяя учесть вариации в крутящем моменте в зависимости от текущего состояния системы.

5. При решении задач управления траловым комплексом необходимо учитывать неоднородность водной среды с точки зрения термодинамики, ведь натурный трал работает в большом диапазоне глубин. К задачам термодинамики относятся и учет влияния гидростатического давления внутри траловой системы, а именно в концевой его части и траловом мешке, и процесс адиабатного дросселирования воды, протекающей через сетную часть траловой системы (преграду).

Для решения данного рода задач добавим к системе уравнений (2) уравнение энергии:

$$\rho \left[\frac{\partial T}{\partial t} + (v \nabla T) \right] = \mu \Phi \frac{\gamma - 1}{\gamma} - \rho \operatorname{grad} T + \alpha \rho \Delta T, \quad (8)$$

улова с проскальзыванием включает в себя дифференциальные уравнения соответственно:

где T – температура воды; Φ – диссипативная функция, характеризующая работу внешних сил; γ – удельная теплоемкость; α – коэффициент температуропроводности.

6. Процесс распространения акустических волн в водной среде является адиабатным. Скорость распространения акустических волн описывается уравнением Лапласа, в котором дифференциал берется вдоль изоэнтропы:

$$a^2 = \frac{\partial p}{\partial \rho}. \quad (9)$$

Неоднородное волновое уравнение акустики для траловой системы имеет вид

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v_\phi^2 \Delta u + f, \quad (10)$$

где u – функция, характеризующая профиль волны; v_ϕ – фазовая скорость звука в водной среде; f – функция внешних сил.

7. При управлении траловой системой используются как световые, так и радиоканалы связи. Мониторинг физических моделей трала и объекта лова возможен с применением систем пространственного видеонаблюдения, основанных в том числе на современных технологиях, например ToF [8]. Кроме указанных, в настоящее время актуальной задачей является исследование влияния различного рода бесконтактных воздействий, в том числе при помощи света, на поведенческие характеристики объекта лова. Для решения указанных задач необходимо учитывать законы распространения светового потока в неоднородных средах. Определяющее уравнение светового потока описывает зависимость величины светового потока от спектральной плотности:

$$\Phi_v = \int K(\lambda) d\Phi_{e,\lambda}, \quad (11)$$

где Φ_v – световой поток; $K(\lambda)$ – функция спектральной световой эффективности монохромати-

ческого излучения от длины волны λ ; $\Phi_{e\lambda}$ – спектральная плотность.

Для нормального человеческого глаза

$$K = K_m V, \quad (12)$$

где K_m – фотометрический эквивалент излучения, $K_m = 683$ лм/Вт; V – относительная спектральная световая эффективность монохроматического излучения.

При применении для пространственной видеофиксации ToF-технологии (Time of Flight) при расчете расстояния до точки объекта наблюдения необходимо вносить поправку на зависимость фазовой скорости распространения света в неоднородных средах от показателя преломления

$$v_c = C/n, \quad (13)$$

а также учитывать явление дисперсии:

$$n = k_a + \frac{k_b}{\lambda_c^2} + \frac{k_c}{\lambda_c^4}, \quad (14)$$

где v_c – фазовая скорость света в среде с коэффициентом преломления n ; C – скорость света в вакууме, $C = 299\,792\,458$ м/с; λ_c – длина световой волны в вакууме; k_a , k_b и k_c – постоянные характеристики материала.

Зависимость (14) является эмпирической и была предложена О. Коши. Постоянные характеристики материала определяются для каждого материала опытным путем.

8. При моделировании работы траловой системы и ее управлении необходимо учитывать законы распространения акустических, световых и радиоволн в неоднородной среде и влияние оптических систем на их распространение. Основные оптические законы (прямолинейного распространения, независимости, отражения, преломления) описываются уравнениями геометрической оптики. Уравнение преломления (закон Снеллиуса) описывает связь параметров преломления сред с углами падения и преломления луча:

$$\frac{\sin \alpha_B}{\sin \beta_B} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (15)$$

где α_B – угол падения луча; β_B – угол преломления луча; n_1 и n_2 – абсолютное преломление первой и второй среды.

Рассмотрим оптическую систему на примере сферической линзы: расстояние связывается с оптической силой линзы, ее геометрией и показателями

преломления сред и имеет следующую зависимость:

$$D_F = \frac{1}{F} = \left(\frac{n_2}{n_1} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right), \quad (16)$$

где D_F – оптическая сила; F – фокусное расстояние; R_1 и R_2 – радиусы кривизны сферических поверхностей линзы.

Приведенные уравнения, описывающие процессы эксплуатации траловых комплексов, позволяют привести их в критериальные уравнения мультифизического подобия тралового комплекса, что позволит обосновать критерии подобия и автоматичность выполнения соответствующих критериев подобия.

Допустим, что условия геометрического, статического, кинематического и динамического подобия выполнены. В этом случае во всех сходственных точках выдерживаются постоянными масштабы однородных физических величин [9]. Чтобы перейти от природы к модели тралового комплекса, надо все физические величины, входящие в уравнения (1)–(16), выразить с помощью масштабов подобия через соответствующие параметры модели тралового комплекса.

В этой связи требуется разработка специализированных компьютерных программ, способных обрабатывать и анализировать обширные объемы данных в мультифизическом контексте рыболовства. Для достижения этой цели нам потребуется команда специалистов, включающая разработчиков программного обеспечения, инженеров по рыболовству, физиков, математиков и других экспертов. Нам может потребоваться создание специализированных алгоритмов для численного расчета масштабов и критериев подобия в различных физических аспектах рыболовства. Эти алгоритмы могут включать в себя моделирование гидродинамических процессов, теплопередачи, световых и звуковых волн, электромагнитных полей и других физических явлений, характерных для рыболовства. Для визуализации результатов работы в трехмерном формате понадобится специализированное программное обеспечение для визуализации данных, которое позволит наглядно представить сложные физические взаимодействия, происходящие в процессах рыболовства.

Иллюстрации снимков экрана рабочего стола программ «Масштабы мультифизического подобия процессов рыболовства» и «Критерии мультифизического подобия процессов рыболовства», представленные на рис. 3, 4, демонстрируют не только функциональность программ, но и их пользовательский интерфейс, что обеспечивает удобство использования для научных исследователей и специалистов в области рыболовства.

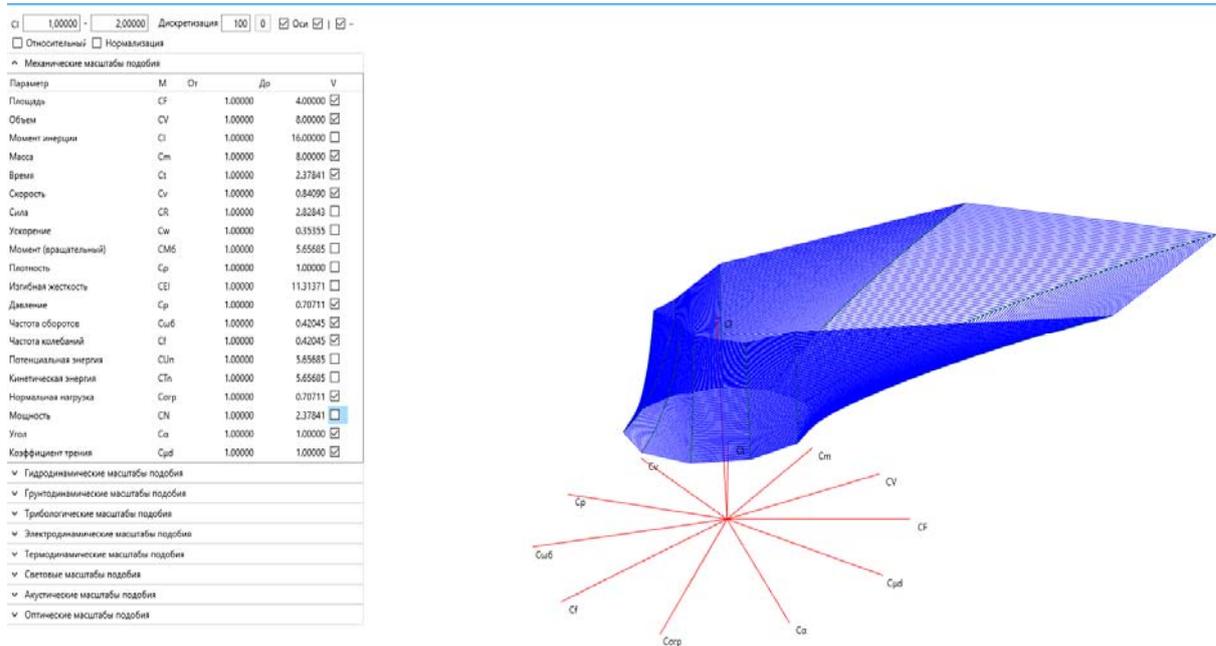


Рис. 3. Рабочий стол компьютерной программы «Масштабы мультифизического подобия процессов рыболовства»

Fig. 3. Desktop of the computer program “Scales of multiphysical similarity of fishing processes”

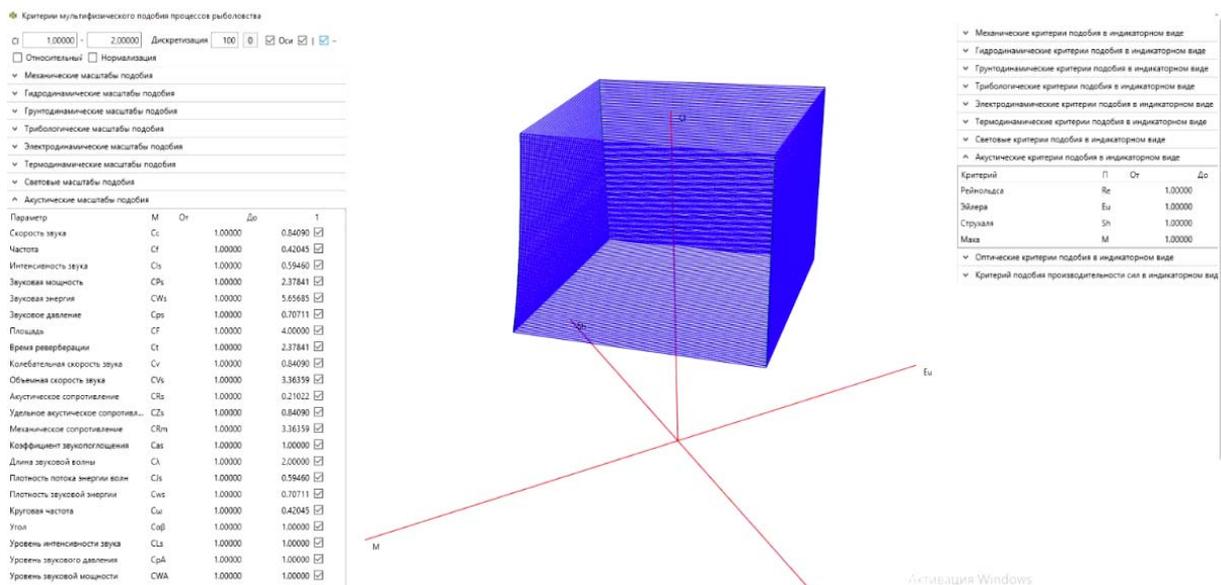


Рис. 4. Рабочий стол компьютерной программы «Критерии мультифизического подобия процессов рыболовства»

Fig. 4. Desktop of the computer program “Criteria of multiphysical similarity of fishing processes”

Результаты

На рис. 5 представлены графики зависимостей $R_x = f(v)$ для двух моделей тралов: N-MWT-m1 3,3/12,0 м и N-MWT-m2 1,65/6,0 м.

Также на этом рисунке представлены кривые $C_r = f(C)$, обозначенные как $Am^{11}Am^{12}$ и $Am^{21}Am^{22}$, которые представляют собой зависимости мультифизического подобия тралов (множество кривых).

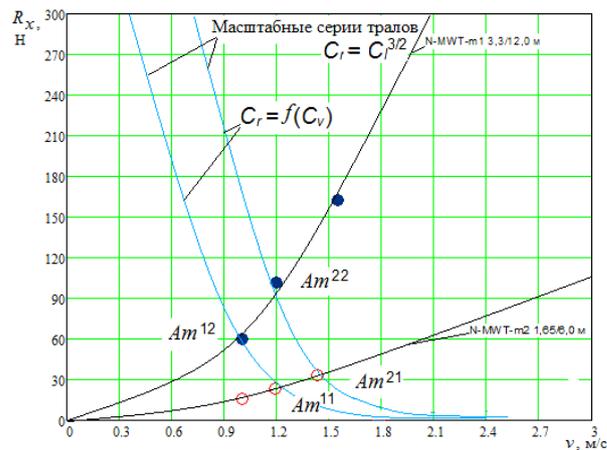


Рис. 5. Графики зависимостей $C_r = f(C_v)$ и $R_x = f(v)$

Fig. 5. Dependency graphs $C_r = f(C_v)$ and $R_x = f(v)$

Отклонение от кривых $Am^{11}Am^{21}$ и $Am^{12}Am^{22}$ означает нарушение подобия при условии соблюдения масштабов. Кривая $Am^{11}Am^{21}$ отражает зависимость $R_x = f(v)$ для модели трала N-MWT-m2 размером 1,65/6,0 м, а кривая $Am^{12}Am^{22}$ представляет собой зависимость $R_x = f(v)$ для модели трала N-MWT-m1 размером 3,3/12,0 м.

Эти графики позволяют визуально оценить соотношения между силой сопротивления трала R_x , скоростью v и коэффициентом мультифизического подобия C_r, C_l для различных моделей тралов. Анализ отклонений от кривых мультифизического подобия дает понимание, насколько эффективно поддерживается подобие в условиях изменения параметров трала.

Аппроксимация соответствующих зависимостей $R_x = f(v)$ в критериальном виде $Ne = f(Re)$ предоставляет возможность тщательно обосновать автомодельность гидродинамического коэффициента сопротивления траловой оболочки c_x в зависимости от числа Рейнольдса Re , играющего ключевую роль в гидродинамике, характеризую отношение между инерционными и вязкостными характеристиками потока. Таким образом, аппроксимация зависимостей $R_x = f(v)$ в критериальной форме предоставляет основание для выявления закономерностей, связывающих нагрузку трала, скорость потока с числом Рейнольдса, что позволяет выделить характерные взаимосвязи между параметрами

траловой системы.

Обоснование автомодельности гидродинамического коэффициента сопротивления траловой оболочки в зависимости от числа Рейнольдса через аппроксимацию существенно улучшает понимание физических процессов, происходящих в траловой системе, предоставляет более обобщенный и устойчивый метод описания воздействия различных факторов на сопротивление трала в различных условиях промысла.

Заключение

В представленной научной статье авторами рассмотрены уравнения, описывающие процессы эксплуатации траловых комплексов (донного и разноглубинного). Определяются необходимые условия, обеспечивающие возможность пересчета результатов, полученных при моделировании тралового комплекса, на реальные натурные траловые комплексы. В рамках исследования определены правила пересчета параметров, характеризующих различные процессы, протекающие в траловых комплексах.

Для систематизации, анализа и синтеза большого объема данных, полученных в ходе экспериментов, используются специально разработанные компьютерные программы. Для верификации полученных данных предложено проводить эксперименты с использованием мультифизического подобия процессов тралового промысла.

Список источников

1. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1977. 440 с.
2. Недоступ А. А. Физическое моделирование гидродинамических процессов движения орудий рыболовства // Вестн. Том. гос. ун-та. Математика и механика. 2012. № 3 (19). С. 55–67.
3. Недоступ А. А., Ражев А. О. Создание правил муль-

4. Ражев А. О., Недоступ А. А., Львова Е. Е. Архитектура программного обеспечения системы автоматизированного проектирования орудий промышленного рыболовства // Материалы 64-й Междунар. науч. конф. Астрахан. гос. техн. ун-та, посвящ. 90-летию юбилею

со дня образования Астрахан. гос. техн. ун-та (Астрахань, 2020): Астрахань: Изд-во АГТУ, 2020. Режим доступа: 1 CD-диск. № гос. регистрации 0322002778. URL: http://www.astu.org/Uploads/files/izdatelstvo/64-%D1%8F%20%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D1%86%D0%B8%D1%8F_%D0%A71.zip (дата обращения: 06.12.2021).

5. Ражев А. О., Недоступ А. А., Львова Е. Е. Расчет формы и нагрузок в рыболовном трале в процессе его проектирования // Материалы 64-й Междунар. науч. конф. Астрахан. гос. техн. ун-та, посвящ. 90-летию юбилею со дня образования Астрахан. гос. техн. ун-та (Астрахань, 2020): Астрахань: Изд-во АГТУ, 2020. Режим доступа: 1 CD-диск. № гос. регистрации 0322002778. URL: http://www.astu.org/Uploads/files/izdatelstvo/64-%D1%8F%20%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D1%86%D0%B8%D1%8F_%D0%A71.zip (дата обращения: 06.12.2021).

6. Ражев А. О., Недоступ А. А., Львова Е. Е. Матема-

тическая модель визуализации крученых канатно-веревочных изделий для задач проектирования орудий промышленного рыболовства // Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промышленное и техническое использование: материалы XI Национ. (Всерос.) науч.-практ. конф. (Петропавловск-Камчатский, 24–25 марта 2020 г.). Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамчатГТУ, 2020. С. 222–226.

7. Недоступ А. А., Наумов В. А., Ражев А. О., Дятченко С. В. Уравнения электродинамического подобия траловых лебедок с электрическим приводом // Морские интеллектуальные технологии. 2020. № 4. Т. 1. С. 87–91.

8. Солощев О. Н., Слюсар В. И., Твердохлебов В. В. Фазовый метод измерения дальности на основе теории многоканального анализа // Артиллерийское и стрелковое вооружение. 2007. № 2 (23). С. 29–32.

9. Недоступ А. А., Ражев А. О. Математическое моделирование орудий и процессов рыболовства. Ч. II: моногр. Калининград: Изд-во КГТУ, 2014. 249 с.

References

1. Sedov L. I. *Metody podobiya i razmernosti v mekhanike* [Similarity and dimensionality methods in mechanics]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 440 p.

2. Nedostup A. A. Fizicheskoe modelirovanie gidrodinamicheskikh processov dvizheniya orudij rybolovstva [Physical modeling of hydrodynamic processes of fishing gear movement]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika*, 2012, no. 3 (19), pp. 55–67.

3. Nedostup A. A., Razhev A. O. Sozdanie pravil multifizicheskogo podobiya tralovogo kompleksa [Creation of rules for the multiphysical similarity of the trawl complex]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, 2021, no. 1, vol. 1, pp. 132–137.

4. Razhev A. O., Nedostup A. A., L'vova E. E. Arhitektura programnogo obespecheniya sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniya orudij promyshlennogo rybolovstva [Software architecture of the computer-aided design system for industrial fishing tools]. *Materialy 64-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, posvyashchennoj 90-letnemu yubileyu so dnya obrazovaniya Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (Astrahan', 2020)*: Astrahan', Izd-vo AGTU, 2020. Rezhim dostupa: 1 CD-disk. № gos. registracii 0322002778. Available at: http://www.astu.org/Uploads/files/izdatelstvo/64-%D1%8F%20%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D1%86%D0%B8%D1%8F_%D0%A71.zip (accessed: 06.12.2021).

5. Razhev A. O., Nedostup A. A., L'vova E. E. Raschet formy i nagruzok v rybolovnom trale v processe ego proektirovaniya [Calculation of the shape and loads in a fishing trawl during its design]. *Materialy 64-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, posvyashchennoj 90-letnemu*

yubileyu so dnya obrazovaniya Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (Astrahan', 2020): Astrahan', Izd-vo AGTU, 2020. Rezhim dostupa: 1 CD-disk. № gos. registracii 0322002778. Available at: http://www.astu.org/Uploads/files/izdatelstvo/64-%D1%8F%20%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D1%86%D0%B8%D1%8F_%D0%A71.zip (accessed: 06.12.2021).

6. Razhev A. O., Nedostup A. A., L'vova E. E. Matematicheskaya model' vizualizacii kruchenyh kanatno-verevochnyh izdelij dlya zadach proektirovaniya orudij promyshlennogo rybolovstva [A mathematical model for visualization of twisted rope products for the tasks of designing tools for industrial fishing]. *Prirodnye resursy, ih sovremennoe sostoyanie, ohrana, promyslovoe i tekhnicheskoe ispol'zovanie: materialy XI Nacional'noj (Vserossijskoj) nauchno-prakticheskoy konferencii (Petropavlovsk-Kamchatskij, 24–25 marta 2020 g.)*. Petropavlovsk-Kamchatskij, Izd-vo KamchatGTU, 2020. Pp. 222–226.

7. Nedostup A. A., Naumov V. A., Razhev A. O., Dyatchenko S. V. Uravneniya elektrodinamicheskogo podobiya tralovyh lebedok s elektricheskim privodom [Equations of electrodynamic similarity of electric powered trawl winches]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, 2020, no. 4, vol. 1, pp. 87–91.

8. Soloshchev O. N., Slyusar V. I., Tverдохлебов V. V. Fazovyy metod izmereniya dal'nosti na osnove teorii mnogokanal'nogo analiza [A phase-based range measurement method based on the theory of multichannel analysis]. *Artillerijskoe i strelkovoe vooruzhenie*, 2007, no. 2 (23), pp. 29–32.

9. Nedostup A. A., Razhev A. O. *Matematicheskoe modelirovanie orudij i processov rybolovstva. Chast' II: monografiya* [Mathematical modeling of fishing tools and processes. Part II: monograph]. Kaliningrad, Izd-vo KGTU, 2014. 249 p.

Статья поступила в редакцию 25.12.2023; одобрена после рецензирования 06.08.2024; принята к публикации 12.12.2024
The article was submitted 25.12.2023; approved after reviewing 06.08.2024; accepted for publication 12.12.2024

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Алексеевич Недоступ – кандидат технических наук, доцент; заведующий кафедрой промышленного рыболовства; Калининградский государственный технический университет; nedostup@klgtu.ru

Алексей Олегович Разжев – кандидат технических наук; ведущий научный сотрудник отдела НИОКР УНИД; Калининградский государственный технический университет; progacpp@live.ru

Павел Владимирович Насенков – специалист по УМР 2 категории в УИЛ САПР техники промышленного рыболовства; Калининградский государственный технический университет; pavel.nasenkov@klgtu.ru

Егор Ильич Сергеев – аспирант кафедры промышленного рыболовства; Калининградский государственный технический университет; pyrojaeger@gmail.com

Alexander A. Nedostup – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Head of the Department of Commercial Fishery; Kaliningrad State Technical University; nedostup@klgtu.ru

Alexey O. Razhev – Candidate of Technical Sciences; Leading Researcher of the R&D Department of Research Management; Kaliningrad State Technical University; progacpp@live.ru

Pavel V. Nasenkov – Specialist in EMW of the 2nd category in the ERL of the CAD of commercial fishing equipment; Kaliningrad State Technical University; pavel.nasenkov@klgtu.ru

Egor I. Sergeev – Postgraduate Student of the Department of Commercial Fishery; Kaliningrad State Technical University; pyrojaeger@gmail.com

