

Научная статья
УДК 639.2.081.1
<https://doi.org/10.24143/2073-5529-2022-2-23-33>

Производительность сил траловой системы – V: предсказательное моделирование

**Александр Алексеевич Недоступ[✉], Алексей Олегович Ражев,
Павел Владимирович Насенков, Карина Витальевна Коновалова**

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

Аннотация. Предсказательное моделирование (ПМ) траловой системы (ТС) – комплексное междисциплинарное и когнитивное представление связей ТС. Предсказательное моделирование ТС предсказывает ее эксплуатационные параметры в различных условиях (переход, травление ваеров, траление, выборка трала и другие процессы). Также на основе ПМ возможно обрабатывать данные экспериментов и численного моделирования совместно, что не совместимо при математическом и физическом моделировании. В процессе проектирования ТС нередко возникает необходимость не только математического, физического, но и предсказательного их моделирования. Под ТС будем понимать сам трал (канатно-сетная часть) с оснасткой подбор, кабельной оснасткой, траловые доски, ваера, соединительные элементы, ваерные лебедки (траловые лебедки), канатно-сетной барабан, датчики (горизонта хода, наполнения тралового мешка, натяжения в ваерах, длины ваера, раскрытия устья трала и др.). Под ПМ будем понимать многомасштабные междисциплинарные процессы, протекающие в ТС. Предсказательное моделирование ТС является одним из важных составляющих виртуальной реальности эксплуатации ТС и, соответственно, важным модулем программно-аппаратного тренажера «Трал». Поставлена задача предсказательного моделирования характеристик канатно-веревочных изделий, из которых изготавливаются канатно-сетные орудия рыболовства ТС. Предложена математическая модель предсказательного моделирования конструктивных, геометрических и силовых характеристик канатно-веревочных изделий. На основании теории подобия возможно прогнозировать значения выходных данных с меньшим количеством характеристик канатно-веревочных изделий. Предложенный метод позволяет без проведения экспериментов на канатах большого диаметра определять их основные физико-механические свойства, т. е. геометрические и силовые характеристики, которые необходимы для моделирования новых элементов ТС.

Ключевые слова: проектирование, траловая система, предсказательное моделирование, теория подобия, канатно-веревочные изделия, производительность

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

Для цитирования: Недоступ А. А., Ражев А. О., Насенков П. В., Коновалова К. В. Производительность сил траловой системы – V: предсказательное моделирование // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2022. № 2. С. 23–33. <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2022-2-23-33>.

Original article

Force performance of trawl system – V: predictive modeling

**Alexander A. Nedostup[✉], Alexey O. Razhev,
Pavel V. Nosenkov, Karina V. Konovalova**

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

Abstract. Predictive modeling (PM) of the trawl system (TS) is a complex, interdisciplinary and cognitive representation of the TS links. Predictive modeling of the vehicle predicts its operational parameters in various conditions (transition, etching of warriors, trawling, hauling of trawl and other processes). It is also possible to process the data of experiments and numerical simulations on the basis of PM together, which is not compatible with mathematical and physical simulations. In the process of designing a vehicle, it is often necessary not only

mathematical, physical, but also their predictive modeling. By TS is meant the trawl itself (cable-net section) with rigging, cable equipment, trawl boards, warp, connecting elements, fan winch (trawl winch), rope net drum, sensors (travel horizon, trawl bag filling, strains in the cords, the length of the cords, the opening of the mouth of the trawl, etc.). By predictive modeling (hereinafter referred to as PM) we will mean multiscale interdisciplinary processes occurring in the TS. Predictive modeling of the vehicle is one of the important components of the virtual reality of the vehicle operation and an important module of the software and hardware simulator Tral. There is set the task of predictive modeling of the characteristics of rope-rope products from which rope-net fishing tools of the TS are made. A mathematical model of predictive modeling of structural, geometric and power characteristics of rope-rope products is proposed. Based on the theory of similarity, it is possible to predict the values of the output data with fewer characteristics of rope products. The proposed method allows, without conducting experiments on ropes of large diameter, to determine their basic physical and mechanical properties, those geometric and power characteristics that are necessary for modeling new elements of the vehicle.

Keywords: designing, trawl system, predictive modeling, similarity theory, cordage, capacity

Acknowledgment: the research was carried out within the framework of the state task “Development of physical, mathematical and predictive models of bottom and midwater trawl complexes operation”.

For citation: Nedostup A. A., Razhev A. O., Nasenkov P. V., Konovalova K. V. Force performance of trawl system – V: predictive modeling. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing Industry.* 2022;2:23-33. (In Russ.) <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2022-2-23-33>.

Введение

В процессе проектирования траловых систем нередко возникает необходимость не только математического, физического, но и предсказательного их моделирования. Под траловой системой (ТС) будем понимать сам трал (канатно-сетная часть) с оснасткой подбор, кабельной оснасткой, траловые доски, ваера, соединительные элементы, ваерные лебедки (траловые лебедки), канатно-сетной барабан, датчики (горизонта хода, наполнения тралового мешка, натяжения в ваерах, длины ваера, раскрытия устья трала и др.) [1]. Под предсказательным моделированием будем понимать многомасштабные междисциплинарные процессы, протекающие в ТС. Предсказательное моделирование ТС является одним из важных составляющих виртуальной реальности эксплуатации ТС и, соответственно, важным модулем программно-аппаратного тренажера «Трал» [2].

Промышленное рыболовство является важной отраслью и элементом экономики приморских регионов РФ, способствующим их социально-экономическому развитию и обеспечению продовольственной безопасности как приморских регионов, так и России в целом. Россия располагает круп-

нейшим в мире водным фондом внутренних водоемов и прибрежных акваторий морей, использование которого носит комплексный многоотраслевой характер. Гидробионтов добывают в основном (70 %) орудиями рыболовства – тралами. Донные и разноглубинные тралы применяются на различных по мощности судах. Тралы представляют собой сложные инженерные сооружения, которые изменяют свою форму в процессе эксплуатации, вследствие чего обслуживать, эксплуатировать и управлять ими достаточно сложно.

В данной статье поставлена задача предсказательного моделирования ТС с аспектами применения 6D управления как инструмента эффективного контроля проектирования, создания и сопровождения жизненного цикла траловой конструкции, или ТС (без судна). Принцип 6D управления подразумевает создание цельной многомерной модели, отражающей динамику конструирования, расходования средств и ресурсов на постройку трала, его эксплуатации на промысле, а также износа трала в процессе его использования и хранения; моделирование работ по ремонту. На рис. 1 изображена разноглубинная ТС.

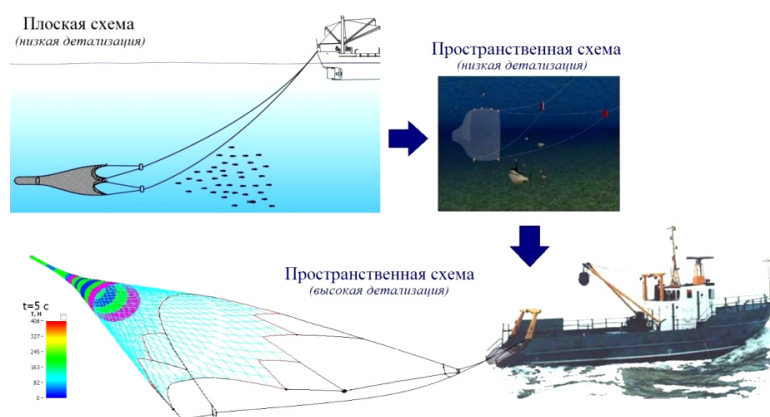


Рис. 1. Разноглубинная траловая система

Fig. 1. Midwater trawl system

Предсказательное моделирование ТС – комплексное междисциплинарное и когнитивное представление связей ТС. Предсказательное моделирование ТС предсказывает ее эксплуатационные параметры в различных условиях (переход, травление ваеров,

траление, выборка трала и другие процессы). На рис. 2 изобразим 3D вид разноглубинного трала, который состоит из множества канатно-веревочных изделий (КВИ).

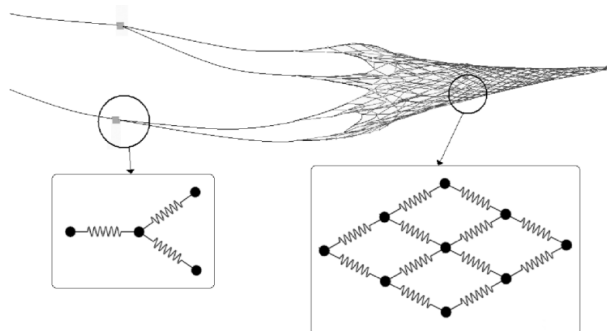


Рис. 2. Разноглубинный трал (канатно-сетная часть)

Fig. 2. Midwater trawl (rope-net part)

Также на основе предсказательного моделирования возможно обрабатывать данные экспериментов и численного моделирования совместно, что не совместимо при математическом и физическом моделировании. При физическом моделировании ТС возможно измерять только определенные характеристики (раскрытие, сопротивление, горизонт хода и др.), но невозможно измерить в ходе испытаний модели ТС такие параметры, как изгибная жесткость канатов, веревок и ниток, из которых изготовлена канатно-сетная часть трала, а также усилие в них, т. к. их определение потребует множества датчиков, при этом масштабирование и математическое моделирование совместимы. На рис. 1 изображена канатно-сетная часть разноглубинного трала 3D, причем спектр отображает натяжения канатов (Н), веревок и ниток (цветовая гамма). В физическом эксперименте получить такую картину невозможно.

Важная характеристика предсказательного моделирования – использование больших данных и масштабность вычислений, т. е. численные модели ТС работают быстрее. Предсказательные модели используются для прогнозирования значений отклика функции или поведения конструкции изделия без проведения дополнительных полномасштабных экспериментов или численных расчетов. В своей основе предсказательная модель описывает поверхность отклика параметров модели или, другими словами, является подменой («черным ящиком») существующих данных или расчетной модели.

Постановка задачи

Воспользуемся термином «производительность сил». Существует производительность сил механических, электродинамических, термодинамических, акустических, оптических, биологических, химических и др. Производительностью силы

можно называть скорость выполнения операции (скорость процесса, скорость химической реакции), а также скорость изменения мощности [1].

В связи с тем, что для рассматриваемых ТС должно соблюдаться условие

$$mw^2 = idem,$$

где m – масса ТС; w – ускорение ТС, производительность сил одной природы ТС, действующих на материальную точку, суммируется.

Это важное обстоятельство требует доказательства, т. к. во время эксплуатации ТС (или БД) мы должны понимать, как управлять ТС.

Для приведения доказательства рассмотрим возможный процесс, протекающий в ТС, а именно натяжение в канатах, веревках и нитках (КВИ) канатно-сетной части трала. Влияние данного процесса (растяжение, удлинение, износ, разрыв и др.) влечет за собой аварийные ситуации с ТС, что снижает КПД ТС η . Коэффициент полезного действия (КПД) – характеристика эффективности ТС. Запишем КПД ТС η :

$$\eta = \frac{H_i}{\sum_{j=1}^n H_j} \left(\frac{t_i}{t} \right)^2 = \kappa t^2,$$

или

$$\left. \begin{aligned} \eta &= \kappa t^2 \\ \eta &= 1 \end{aligned} \right\},$$

где H_i – значение производительности сил ТС i -го интервала времени, $i \in [1, \dots, n]$; $\sum H_j$ – суммарная производительность ТС; t_i – i -й интервал времени; $t = \sum t_j$ – время процесса (рассматриваемого в рамках ТС); κ – безразмерная производительность сил;

τ – безразмерное время; n – количество непересекающихся по времени интервалов; ι – безразмерная работа.

Отметим, что две ТС подобны при условии

$$\eta_m = \eta_n,$$

где η_m – КПД модели ТС; η_n – КПД натурной ТС.

Рассмотрим в безразмерном виде

$$\kappa = \frac{H_i}{\sum_{j=1}^n H_j};$$

$$\iota = \frac{A_i}{\sum_{j=1}^n A_j},$$

где A_i – значение работы ТС на i -м интервале времени; $\sum A_j$ – суммарная работа ТС за процесс;

$$\tau = t_i/t;$$

$$\chi = \frac{F_i}{\sum_{j=1}^n F_j},$$

где χ – безразмерная сила; F_i – абсолютное значение сил ТС, усредненное на i -м интервале времени; $\sum F_j$ – сумма усредненных по интервалам времени абсолютных значений сил ТС за процесс.

Рассмотрим деформацию растяжения КВИ [3]. Представим, что КВИ подверглась продольному растяжению с усилием T (рис. 3).

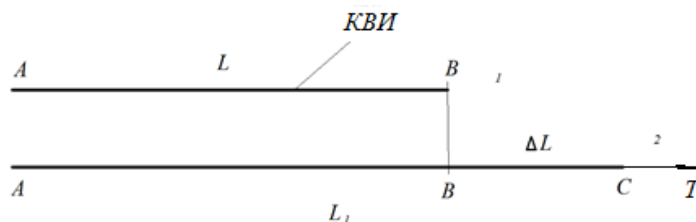


Рис. 3. КВИ до продольного растяжения (1) и после растяжения (2): L – длина

Fig. 3. KVI before longitudinal stretching (1) and after stretching (2): L - length

Масса КВИ не изменяется, т. е. его $M = \text{const}$, приращение длины определим по выражению $L_1 = L + \Delta L$, где ΔL – приращение длины, относительное удлинение КВИ определяется по формулам

$$\begin{cases} \varepsilon = \Delta L/L; \\ \varepsilon = \sigma/E, \end{cases}$$

где σ – напряжение КВИ; E – модуль упругости (модуль Юнга). При этом нужно понимать, что относительное удлинение КВИ ε изменяется не по линейному закону.

Методы исследования

Для решения поставленной задачи, а именно определения производительности сил ТС (в примере КВИ), будем придерживаться закона сохранения масс и закона сохранения энергии. Разобьем КВИ массой M на n участков одинаковой массой

$$M = \sum_{i=1}^n m_i = nm_i,$$

где $i \in [1, \dots, n]$; m_i – масса участка. Соответственно, длины каждого участка КВИ (до растяжения) – l_i . В таком случае производительность сил КВИ при ее растяжении соответствует

$$H = Mw^2 = Tw,$$

или

$$MH = T^2;$$

$$\sum_{i=1}^n m_i H = T^2,$$

где w – ускорение движения улитки разрывной машины.

Так как в экспериментах [4] при исследовании усилия T КВИ были получены одинаковые значения T (с ошибкой 3%), предположим, что испытываемые образцы КВИ с различной L будут иметь $T = \text{const}$ для определенного КВИ (при постоянстве всех других параметров). Так как в экспериментах невозможно было определить ускорение движения улитки разрывной машины, рассмотрим безразмерный вид

$$\frac{m_i}{M} \frac{H_i}{H} = \left(\frac{T_i}{T} \right)^2, \quad (1)$$

где H_i – производительность сил i -участка L КВИ; T_i – сила растяжения участка.

Значение $T = \text{const}$ по длине КВИ возможно только при ускорении, стремящимся к 0, в таком случае выражение (1) примет вид

$$\frac{m_i H_i}{M H} = 1,$$

или в безразмерном виде

$$\kappa = 1, \quad (2)$$

где o – безразмерная масса КВИ.

Запишем (2) в виде

$$\kappa = 1/o. \quad (3)$$

Графическая интерпретация (2) изображена на рис. 4 в виде $\kappa = f(o)$.

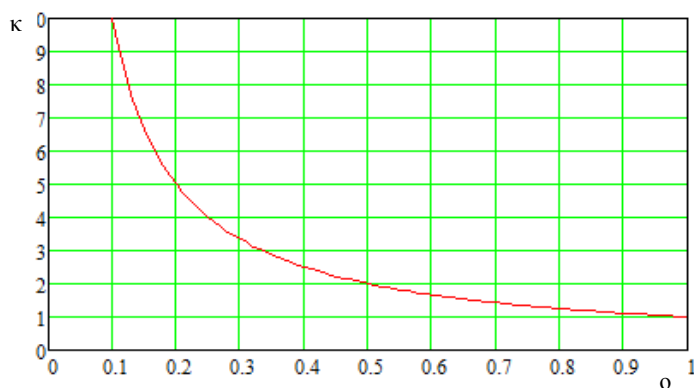


Рис. 4. Зависимость вида $\kappa = f(o)$ при $T = \text{const}$

Fig. 4. Dependence of $\kappa = f(o)$ for $T = \text{const}$

Общий вид безразмерного выражения (3) принимает вид

$$\kappa = \chi \varpi = o \varpi^2, \quad (4)$$

где ϖ – безразмерное ускорение участка КВИ, или, с учетом (2) при $\chi = 1$,

$$\kappa = \varpi. \quad (5)$$

На основании (5) сделаем вывод, что при растяжении КВИ $T = \text{const}$ ускорение движения участков с массой m_i различное.

На основании (4) безразмерное ускорение

$$\varpi = \sqrt{\frac{\kappa}{o}}. \quad (6)$$

Графическая интерпретация (6) изображена на рис. 5 в виде $\varpi = f(o)$.

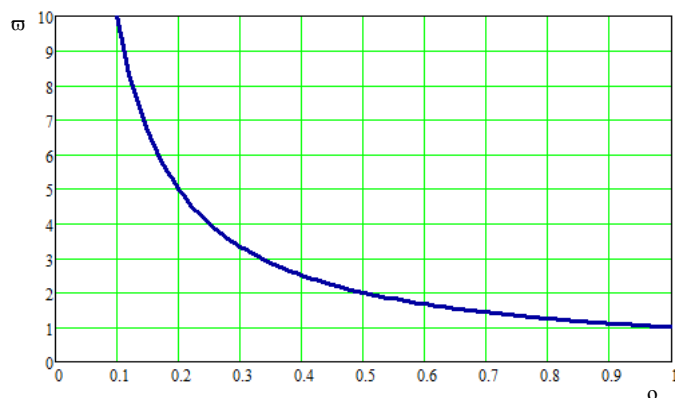


Рис. 5. Зависимость вида $\varpi = f(o)$ при $T = \text{const}$

Fig. 5. Dependence of $\varpi = f(o)$ for $T = \text{const}$

Из графиков рис. 3 и 4 видно, что безразмерная производительность участка КВИ к массой m_i пропорциональна безразмерному ускорению этого участка ω при стремлении ускорения к 0. На основании зависимости (6) и ее интерпретации, изображенной на рис. 5, сделаем вывод, что для одинаковой силы растяжения T КВИ должно соблюдаться условие: чем меньше ускорение движения участков l_i массой m_i , тем больше должно быть их ускорение ω_i . Представим ускорение КВИ w (при приложении нагрузки) в виде

$$w = \Delta L / t^2. \quad (7)$$

Согласно закону Гука относительное удлинение

$$\varepsilon = T / (ES), \quad (8)$$

где S – площадь сечения КВИ (принимая, что сечение КВИ – окружность).

Относительное сужение КВИ

$$\varepsilon_d = \Delta d / d \leq 1, 0,$$

где Δd – изменение диаметра КВИ (уменьшение); d – диаметр КВИ.

Для анизотропного материала (КВИ) коэффициент Пуассона

$$\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon} = \left(\frac{\Delta l_i}{\Delta l} \right) / \left(\frac{\Delta L}{L} \right) = \left(\frac{\Delta l_i}{\Delta L} \right) \left(\frac{L}{\Delta l} \right) = n \frac{\Delta l_i}{\Delta L} = \frac{\Delta l_i}{\Delta l} = \frac{w_i t_i^2}{w t^2} = \omega \tau^2, \quad (11)$$

где $\Delta L = n \Delta l$; Δl – приращение длины i -го участка КВИ; w_i – изменение ускорения растяжения КВИ.

В выражении (10) безразмерные комплексы

$$e = E_i / E;$$

$$e_d = d_i / d = 1 - \varepsilon_{di},$$

где ε_{di} – изменение относительного сужения КВИ. Тогда выражение (10) примет вид

$$\omega \tau^2 e (1 - \varepsilon_{di})^2 = \chi = \sqrt{\text{ко}}. \quad (12)$$

Если $\chi = 1$ (ускорение стремится к 0), то выражение (12) представим в виде

$$\omega \tau^2 e (1 - \varepsilon_{di})^2 = \omega \tau^2 e (1 - \mu_{di} \varepsilon_i)^2 = 1,$$

где μ_{di} – изменение коэффициента Пуассона.

Так как при больших силах растяжения КВИ E можно принять за постоянное значение ($e = 1$) и с учетом (11), тогда

$$\varepsilon_i = \frac{\varepsilon}{(1 - \varepsilon_{di})^2} = \frac{\varepsilon}{(1 - \mu_{di} \varepsilon_i)^2}.$$

В расчетах КВИ примем, что коэффициент Пуассона для определенного типа, диаметра и вида КВИ меняется (анизотропный материал), т. е. $\mu_d \neq \text{const}$, в момент разрыва $\mu_d = 0$.

$$\mu_d = \varepsilon_d / \varepsilon.$$

Напряжение КВИ, в соответствии с (8), составляет

$$T = \varepsilon ES,$$

тогда, с учетом (1), получаем

$$\varepsilon^2 E^2 S^2 = T^2 = Hm. \quad (9)$$

В безразмерном виде (9), с учетом площади сечения КВИ, выглядит как

$$\left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon} \right)^2 \left(\frac{E_i}{E} \right)^2 \left(\frac{S_i}{S} \right)^2 = \left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon} \right)^2 \left(\frac{E_i}{E} \right)^2 \left(\frac{d_i}{d} \right)^4 = \chi^2, \quad (10)$$

или

$$\left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon} \right) \left(\frac{E_i}{E} \right) \left(\frac{d_i}{d} \right)^2 = \chi,$$

где ε_i – изменение относительного удлинения; S_i – изменение площади сечения; E_i – изменение модуля упругости КВИ; d_i – изменение диаметра КВИ.

В выражении (10) безразмерные комплексы соответствуют при условии (7):

Общий вид изменения безразмерных характеристик КВИ

$$(\varepsilon_i / \varepsilon) e (1 - \mu_{di} \varepsilon_i)^2 = \chi. \quad (13)$$

На основании выражения (13) возможно предсказывать относительное и поперечное удлинение КВИ, имеющих различные геометрические характеристики, при условии наличия исходных данных по КВИ ε , ε_d и μ_d , а также E .

Предсказательное моделирование силовых характеристик КВИ (микроуровень). На основании теории подобия возможно прогнозировать значения выходных данных с меньшим количеством характеристик КВИ (сравнение с оригиналом) [5]. В статьях [6, 7] описан метод определения масштабов подобия рыболовных КВИ на примере испытаний крученых КВИ, изготовленных из полиамидных волокон. Предложенный метод позволяет без проведения экспериментов на канатах большого диаметра определять их основные физико-механические свойства, т. е. геометрические и силовые характеристики, которые необходимы для моделирования новых элементов ТС.

Предсказательное моделирование на молекулярном уровне КВИ (макроуровень). Силовая характеристика межмолекулярного взаимодействия показана на рис. 6.

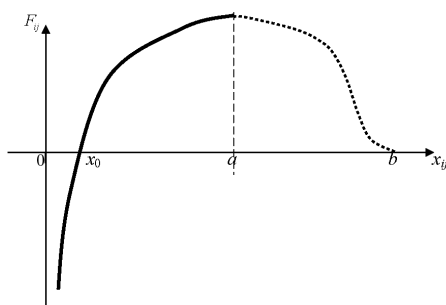


Рис. 6. Силовая характеристика межмолекулярного взаимодействия:
 x_{ij} – координата расстояния между двумя молекулами (макромолекулами) i и j ;
 F_{ij} – координата силы взаимодействия между двумя молекулами; x_0 – расстояние между молекулами, при котором взаимное отталкивание сменяется на взаимное притяжение; a – расстояние, на котором сила притяжения максимальна; b – граничное расстояние, при превышении которого взаимодействие между молекулами не учитывается

Fig. 6. Force characteristic of intermolecular interaction:
 x_{ij} - distance coordinate between two molecules (macromolecules) i and j ;
 F_{ij} - coordinate of the interaction force between two molecules; x_0 - distance between molecules, at which mutual repulsion is replaced by mutual attraction; a - distance at which the force of attraction is maximum; b - boundary distance, above which the interaction between molecules is not taken into account

Зависимость на участке $[0, a]$ (сплошная кривая) аппроксимируется логарифмической функцией, а на участке $[a, b]$ (пунктирная кривая) – распределенной функцией Хевисайда [8], представленной кубической параболой.

Запишем результирующую зависимость силы взаимодействия молекул от расстояния между ними на интервале $[0, b]$:

$$F_{ij} = k_1 \lg \left(1 + k_2 \frac{x_{ij} - x_0}{x_0} \right) \text{step}(x_{ij}, a, 1, b, 0) - k_3 \frac{dx_{ij}}{dt},$$

где k_1 – коэффициент пропорциональности; k_2 – коэффициент формы логарифма; $\text{step}(\dots)$ – обозначение step-функции [9]; k_3 – коэффициент вязкого трения; t – время растяжения.

Результаты и обсуждение

Предсказательные модели силовых характеристик КВИ используются для прогнозирования значений отклика функции или поведения КВИ, из которых изготовлена ТС, без проведения дополнительных полномасштабных экспериментов или численных расчетов. На рис. 7 изображена структура модели предсказательного моделирования ТС.

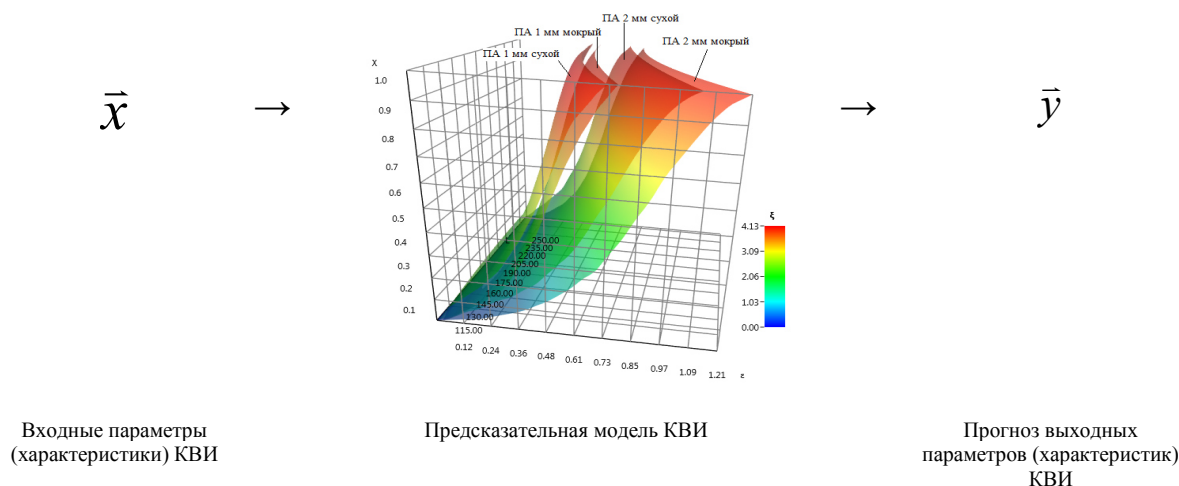


Рис. 7. Структура разработки модели предсказательного моделирования ТС

Fig. 7. Structure of the design of a model of predictive modeling of TS

Блоки построения и управления моделями предсказательного моделирования ТС включают

набор инструментов для построения и управления предсказательными моделями. Все его компоненты

Недоступ А. А., Ражев А. О., Насенков П. В., Коновалова К. В. Производительность сил траповой системы – V: предсказательное моделирование

могут работать как с данными, собранными из расчетных схем, так и с данными, импортированными из файлов в любом формате. Построенные модели

могут использоваться для получения прогнозов или последующей интеграции в расчетные схемы (рис. 8).

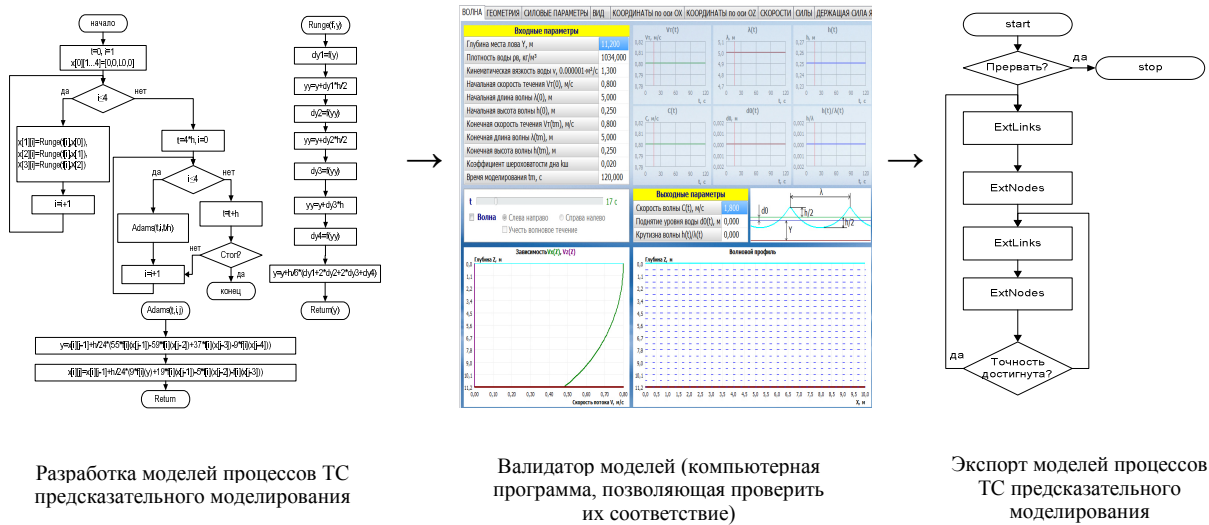


Рис. 8. Структура управления моделями предсказательного моделирования ТС

Fig. 8. Structure of control over the models of predictive modeling of TS

Структура управления моделями предсказательного моделирования ТС проста в использовании. Осуществляются полный контроль над временем построения модели и проверка качества моделей, сравнение их с исходными данными и между собой. Слияние данных – мощный инструмент предсказательного моделирования, дополняющий инструментарий для построения моделей и позволяющий использовать наборы данных с различной достоверностью. В качестве входных данных для построения моделей при слиянии данных исполь-

зуются наборы с высокой и низкой точностью. Предполагается, что эти наборы данных генерируются с использованием источников или моделей с высокой и низкой достоверностью соответственно, например при помощи экспериментов и расчетных моделей. Благодаря слиянию данных количество дорогостоящих экспериментов и расчетов может быть уменьшено из-за более точных предсказаний, сделанных с помощью предсказательных моделей (рис. 9).

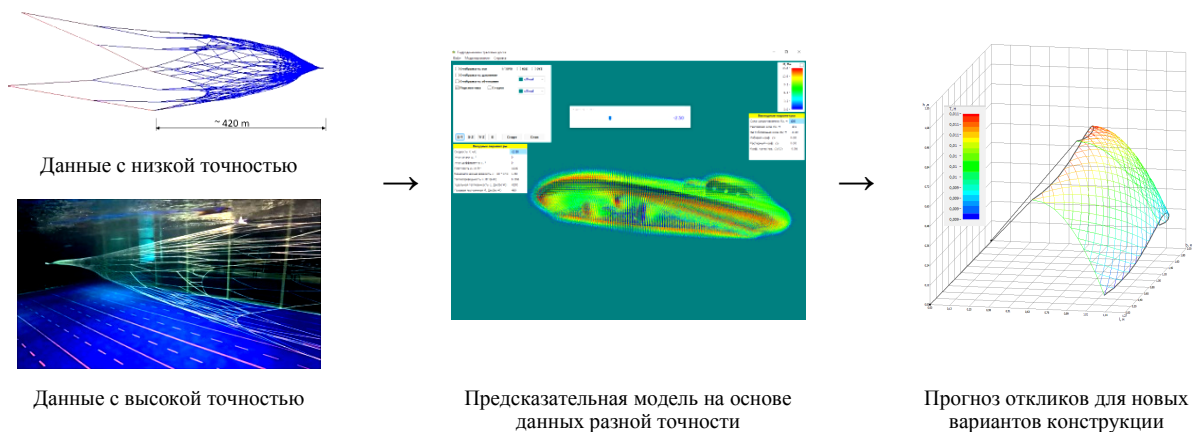


Рис. 9. Слияние данных для модели предсказательного моделирования ТС

Fig. 9. Data fusion for the model of TS predictive modeling

Такие сложные объекты, как ТС, описываются большим числом параметров (конструктивные, геометрические, силовые, поведенческие и т. д.). При предсказательном моделировании силовых характеристик КВИ полезно снизить размерность

описания. Это возможно на основании теории подобия динамических процессов ТС.

На рис. 10 изображена структура управления раз- мерностью предсказательного моделирования ТС.

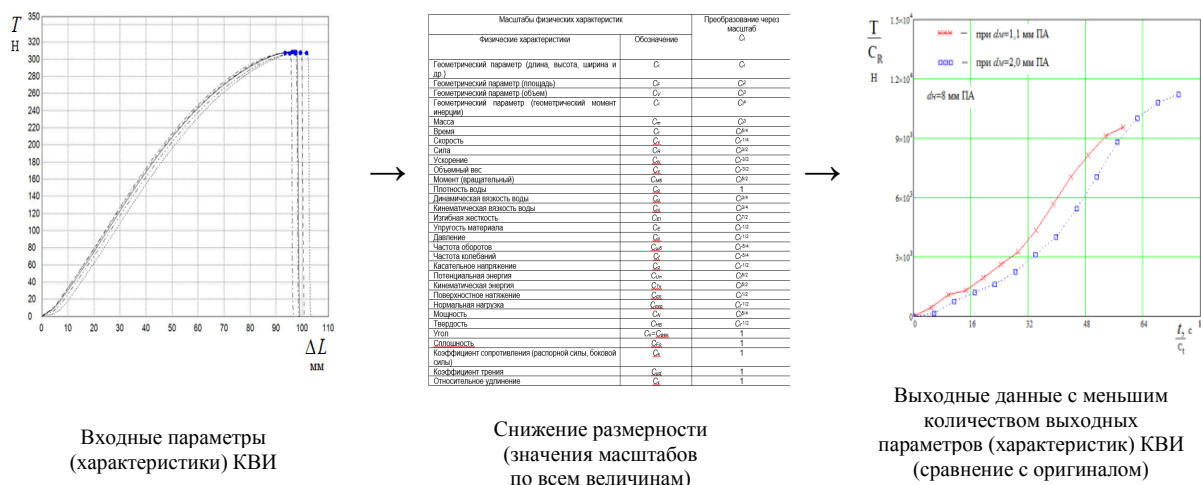


Рис. 10. Структура управления размерностью предсказательного моделирования ТС

Fig. 10. Dimension control structure of predictive modeling TS

В процессе проектирования ТС возникает необходимость в предсказательном моделировании эксплуатации ТС. Важным обстоятельством проектирования любой системы является процесс определения архитектуры, компонентов, интерфейсов и других характеристик системы или ее части. Проектирование, наряду с анализом требований, является частью большой стадии жизненного цикла системы, называемой определением системы. Результаты этой стадии являются входной информацией для стадии реализации (воплощения) системы. В настоящее время существует заметная тенденция рассматривать проектирование как объединение видов деятельности – системное проектирование, т. е. от 2D до 6D.

Результатом проектирования ТС является проект – целостная совокупность характеристик, описанных в форме, пригодной для ее эксплуатации с заданной производительностью сил. Системное проектирование комплексно решает поставленные задачи, принимает во внимание взаимодействие и взаимосвязь отдельных объектов-систем и их частей как между собой, так и с внешней средой, учитывает социально-экономические и экологические последствия их функционирования. И главной задачей проектирования ТС является повышение производительности труда.

Заключение

Предсказательное моделирование траловой системы – комплексное, междисциплинарное и когнитивное представление ее связей. Предсказательное моделирование траловой системы предсказывает ее эксплуатационные параметры в различных условиях (переход, травление ваеров, траление, выборка трала и другие процессы). Предсказательное моделирование траловой системы является одним из важных составляющих виртуальной реальности ее эксплуатации и является важным модулем программно-аппаратного тренажера «Трал». В статье поставлена задача предсказательного моделирования характеристик канатно-веревочных изделий, из которых изготавливаются канатно-сетные орудия рыболовства траловой системы. Предложена математическая модель предсказательного моделирования конструктивных, геометрических и силовых характеристик канатно-веревочных изделий. Предложено использовать теорию подобия для прогнозирования значений выходных данных характеристик канатно-веревочных изделий. Предложенный метод позволяет без проведения экспериментов на канатах большого диаметра определять их основные физико-механические свойства, т. е. геометрические и силовые характеристики, которые необходимы для моделирования новых элементов траловой системы.

Список источников

1. Недоступ А. А., Ражев А. О. Производительность сил траловой системы – I (постановка задачи) // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Рыбное хозяйство. 2021. № 2. С. 55–65.
2. Волкогон В. А., Недоступ А. А., Ражев А. О., Кострикова Н. А., Поляков Р. К., Кузин В. И. Обоснование создания тренажерного комплекса по проектированию

- и моделированию траловых систем // Мор. интеллект. технологии. 2017. № 4 (38). Т. 2. С. 177–185.
3. Недоступ А. А., Коновалова К. В., Насенков П. В., Ражев А. О., Альтицль Б. А., Федоров С. В. Относительная жесткость рыболовных крученых изделий // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Рыбное хозяйство. 2020. № 1. С. 46–60.

4. Насенков П. В., Недоступ А. А., Наумов В. А. Экспериментальные исследования разрывного усилия и относительного удлинения рыболовных веревочно-нитевидных изделий с различной скоростью разрыва и длиной исследуемых образцов // Изв. КГТУ. 2020. № 58. С. 35–48.

5. Недоступ А. А. Физическое моделирование гидродинамических процессов движения орудий рыболовства // Вестн. Том. гос. ун-та. Математика и механика. 2012. № 3 (19). С. 55–67.

6. Недоступ А. А., Насенков П. В., Ражев А. О., Коновалова К. В., Федоров С. В. Обоснование правил подбора разрывной нагрузки рыболовных крученых изделий // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Рыбное хозяйство. 2020. № 1. С. 38–45.

1. Nedostup A. A., Razhev A. O. Proizvoditel'nost' sil tralovoi sistemy – I (postanovka zadachi) [Productivity of trawl system – I (problem statement)]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Rybnoe khoziaistvo*, 2021, no. 2, pp. 55-65.

2. Volkogon V. A., Nedostup A. A., Razhev A. O., Kostrikova N. A., Poliakov R. K., Kuzin V. I. Obosnovanie sozdaniia trenazhernogo kompleksa po proektirovaniu i modelirovaniu tralovykh sistem [Substantiation of creation of simulator complex for design and modeling trawl systems]. *Morskoe intellektual'nye tekhnologii*, 2017, no. 4 (38), vol. 2, pp. 177-185.

3. Nedostup A. A., Konovalova K. V., Nasenkov P. V., Razhev A. O., Al'tshul' B. A., Fedorov S. V. Otnositel'naia zhestkost' rybolovnykh kruchenykh izdelii [Relative rigidity of twisted fishing gear]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Rybnoe khoziaistvo*, 2020, no. 1, pp. 46-60.

4. Nasenkov P. V., Nedostup A. A., Naumov V. A. Eksperimental'nye issledovaniia razryvnogo usilii i otnositel'nogo udlineniia rybolovnykh verevochno-nitevidnykh izdelii s razlichnoi skorost'iu razryva i dlinoi issleduemykh obraztsov [Experimental studies of breaking force and relative elongation of fishing rope-filament products with different breaking speed and length of the studied samples]. *Izvestiia KGTU*, 2020, no. 58, pp. 35-48.

5. Nedostup A. A. Fizicheskoe modelirovanie gidrodinamicheskikh protsessov dvizheniia orudii rybolovstva

7. Недоступ А. А., Коновалова К. В., Насенков П. В., Ражев А. О., Федоров С. В. Обоснование правил подбора изгибной жесткости рыболовных крученых изделий // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Рыбное хозяйство. 2020. № 1. С. 77–85.

8. Методы классической и современной теории автоматического управления: учеб. в 5 т. / под ред. К. А. Пупкова, Н. Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. Т. 1. Математические модели, динамические характеристики и анализ систем автоматического управления. 656 с.

9. Bachman G., Narici L., Beckenstein E. *Fourier and Wavelet Analysis*. N. Y.: Springer, 2000. 506 p.

References

[Physical modeling of hydrodynamic processes of fishing gear movement]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika*, 2012, no. 3 (19), pp. 55-67.

6. Nedostup A. A., Nasenkov P. V., Razhev A. O., Konovalova K. V., Fedorov S. V. Obosnovanie pravil podobiiia razryvnoi nagruzki rybolovnykh kruchenykh izdelii [Substantiation of rules of similarity of breaking load of twisted fishing gear]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Rybnoe khoziaistvo*, 2020, no. 1, pp. 38-45.

7. Nedostup A. A., Konovalova K. V., Nasenkov P. V., Razhev A. O., Fedorov S. V. Obosnovanie pravil podobiiia izgibnoi zhestkosti rybolovnykh kruchenykh izdelii [Substantiation of similitude rules of bending stiffness of twisted fishing gear]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Rybnoe khoziaistvo*, 2020, no. 1, pp. 77-85.

8. *Metody klassicheskoi i sovremennoi teorii avtomaticheskogo upravleniia: uchebnik v 5 tomakh* [Methods of classical and modern theory of automatic control: textbook in 5 volumes]. Pod redaktsiei K. A. Pupkova, N. D. Egupova. Moscow, Izd-vo MGTU im. N. E. Bauman, 2004. Vol. 1. Matematicheskie modeli, dinamicheskie kharakteristiki i analiz sistem avtomaticheskogo upravleniia. 656 p.

9. Bachman G., Narici L., Beckenstein E. *Fourier and Wavelet Analysis*. New York, Springer, 2000. 506 p.

Статья поступила в редакцию 13.10.2021; одобрена после рецензирования 23.05.2022; принята к публикации 07.06.2022
The article is submitted 13.10.2021; approved after reviewing 23.05.2022; accepted for publication 07.06.2022

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 Ражев – младший научный сотрудник; Калининградский государственный технический университет; progacpp@live.ru

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 – Junior Researcher; Kaliningrad State Technical University; 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

Карина Витальевна Коновалова – магистрант кафедры промышленного рыболовства; Калининградский государственный технический университет; karina.konovalova@klgtu.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

Karina V. Konovalova – Masters' Course Student of the Department of Commercial Fishery; Kaliningrad State Technical University; karina.konovalova@klgtu.ru

