

**Теория корабля и строительная механика**

Научная статья

УДК 629.12; 629.58

DOI: <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2023-2/3-12>

Е.В. Штагер, Т.А. Зацаринная

ШТАГЕР ЕЛЕНА ВАСИЛЬЕВНА – к.п.н., доцент, [shtager.ev@dvfu.ru](mailto:shtager.ev@dvfu.ru)<https://orcid.org/0000-0001-7663-4294>ЗАЦАРИННАЯ ТАМАРА АЛЕКСАНДРОВНА – студент, [zatcarinnaya.ta@students.dvfu.ru](mailto:zatcarinnaya.ta@students.dvfu.ru)

Политехнический институт

*Дальневосточный федеральный университет*

Владивосток, Россия

**Об одном подходе к подбору параметров прогностической диагностики погружного аппарата**

**Аннотация.** Актуальной задачей современного этапа инженерного диагностирования выступает прогностическая диагностика как процедура оценки вероятных эволюционных состояний объекта. Для технического прогнозирования весьма специфической является проблема подбора параметров прогностики. Целью исследования заявлена демонстрация применения научного метода классической механики для построения математической модели дифференциального вида как валидной базы выявления параметров прогнозирования. Объектом исследования выбрана погружная конструкция, выполняющая функции подводного плавательного аппарата. Технологический процесс погружения-всплытия представлен аналитической формой дифференциальных уравнений, частные решения которых сформировали уравнения рабочего процесса. Структурно-логический анализ уравнений движения позволил обосновать существование комплекса обобщенных диагностических признаков как базовых параметров прогностической диагностики.

**Ключевые слова:** объекты морской техники, погружной аппарат, математическая модель дифференциального вида, параметры прогностики

**Для цитирования:** Штагер Е.В., Зацаринная Т.А. Об одном подходе к подбору параметров прогностической диагностики погружного аппарата // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2023. № 2(55). С. 3–12.

**Введение**

Для эффективной эксплуатации инженерных систем и минимизации затрат на техническое обслуживание необходима своевременная и точная диагностика состояния объекта. Наиболее прогрессивным видом диагностирования выступает прогностическая диагностика как процедура организации оценки жизнедеятельности исследуемого объекта на базе так называемых прогнозирующих параметров. Выявление системы таких параметров и теоретико-практическое обоснование алгоритма прогнозирования формирует целеполагание технической прогностики как современного этапа инженерного диагностирования в целом [1, 2]. Основополагающей задачей технического прогнозирования выступает предсказание технического состояния объекта для определенных будущих моментов времени, то есть вероятных эволюций состояния объекта. Такой подход позволяет наиболее эффективно решать проблемы выяснения срока службы инженерной системы, назначения профилактических проверок и ремонтов.

Для технического прогнозирования весьма специфической является проблема подбора прогнозирующих параметров. Зачастую такие параметры выбираются интуитивно на основе

знания функционально-механических свойств определенных объектов в условиях их эксплуатации, то есть чисто экспериментальным путем. Такой подход сопряжен со значительным включением в процедуру диагностики фактора случайности, «размывающего» достоверность заключения о состоянии инженерной системы. Сложность установления валидных прогнозирующих параметров, на наш взгляд, связана с недостаточной разработанностью формализованных методов описания связи между параметрами технического состояния и диагностическими признаками. Решение данной проблемы предлагает методология прогностической диагностики, постулирующая необходимость построения, в первую очередь математической модели (формализованное описание) диагностируемого объекта как теоретической базы выявления диагностических параметров и разработки алгоритма постановки диагноза [9].

Задачи технического прогнозирования наиболее актуальны для судостроительного кластера как области инженерии, проектирующей и эксплуатирующей наиболее сложные с позиции комплекса физико-механических взаимодействий технические системы. В настоящее время особое внимание уделяется разработке математических моделей как для различных классов объектов морской техники (надводных судов и подводных аппаратов), так и для специфических конструктивных узлов, обеспечивающих жизнедеятельность объектов кораблестроения (подшипники, системы электропривода и др.) [3–5, 8]. Такие модели ориентированы на решение задачи выделения из бесконечного множества технических состояний объекта диагностики конечного набора диагнозов, которые следует диагностировать, дать формализованное описание этих технических состояний и, в конечном итоге, непосредственно собрать прогностическую информацию. Следует отметить наличие широкого спектра форм математического описания объектов морской инфраструктуры – табличная, графическая, аналитическая. Многовариантность математических моделей, обусловленная целезаданием каждого исследования, постулирует существование определенного множества параметров диагностики жизнедеятельности технических систем.

Научные исследования, посвященные составлению алгоритма технического диагностирования объектов морской техники, в большинстве своем ориентированы на построение математической модели по принципу графов причинно-следственных связей между параметрами, событиями или явлениями [4, 5]. Результатом моделирования выступает программный продукт, предлагаемый к использованию как на начальном этапе проектирования для автоматизации расчетов, так и для экспресс-оценки характеристик и экономической эффективности судов для заданных линий эксплуатации. Одновременно с этим широкое распространение в корабельной инженерии получило использование готовых профессиональных программных продуктов, например ANSYS 19 R2 Academic Research [13], и их адаптация к построению модели исследуемого объекта и обоснованию подбора соответствующих прогностических параметров [4]. Как правило, исследование причинно-следственных связей между параметрами технического состояния позволяет представить математическую модель в виде таблицы состояний объекта диагностирования (каждая строка таблицы содержит коэффициенты, которые показывают, во сколько раз изменится выходной диагностический параметр при изменении одного из возмущающих факторов) [11].

Характерной особенностью физико-механических взаимодействий объектов морской техники выступает наличие параметров диагностики на непрерывном множестве пространства существования, характеризующемся как сплошная среда. Поскольку выделение конкретных параметров технического диагностирования для гидро-газообразных субстанций невозможно, математическую модель представляют в виде аналитических зависимостей между входными возмущениями, параметрами технического состояния и диагностическими характеристиками. Такие аналитические модели представляются в виде алгебраических уравнений. Используя научную парадигму механики сплошных сред (уравнения Навье–Стокса, уравнения Рейнольдса) разработаны математические модели, реализованные системой алгебраических уравнений в тензорной форме [4, 8]. Как правило, такие модели, как модели описания турбулентных течений, задают объект диагностики системой линейных алгебраических уравнений, в которых количество уравнений равно числу неизвестных параметров технического

состояния или числу диагнозов. Вместе с тем модель может быть представлена и в виде системы нелинейных алгебраических уравнений. В этом случае необходимо произвести их линеаризацию. Решение такой задачи для разработки алгоритма диагностики электропривода предложено на основе логико-динамического подхода [3]. Авторами исследования отмечается, что для построения математической модели нелинейных систем (люфт, сухое трение и др.) необходимо вначале найти линейное решение задачи, которое затем дополнить преобразованным нелинейным членом. Особенность логико-динамического подхода состоит в том, что он оперирует только методами линейной алгебры, что позволяет избежать использования методов дифференциальной геометрии и пакетов прикладных программ, реализующих сложные аналитические вычисления.

Аналитические модели алгебраического вида позволяют сформировать для каждого диагностируемого объекта так называемую матрицу коэффициентов влияния, аналогичную по своим свойствам таблицам состояний. Прогностические задачи при этом формулируются следующим образом: по известным измеренным значениям диагностических параметров на основании матрицы коэффициентов влияния либо таблицы состояний поставить диагноз [2, 11].

Подчеркивая несомненную эффективность проанализированных видов математических моделей для решения задач диагностики технического состояния объектов морской инфраструктуры, следует отметить недостаточную информативность значительного ряда формируемых в результате математического моделирования диагностических параметров. Такая недостаточность связывается, в первую очередь, с так называемой диагностической ценностью параметров. Большинство современных исследований ориентировано на разработку процедуры оценки параметров состояния как первичных величин, количественно характеризующих одно из основных свойств объекта или процесса, протекающего в нем. В качестве параметров состояния принимаются массы, различные коэффициенты, геометрические особенности корпуса судна и т.п.

С позиции уровней методологического анализа научного знания такие параметры с достаточной долей вероятности следует относить к разряду феноменологических величин, формирующих область конкретно-научного знания инженерии. Решение задач прогностики требует более высокой степени обобщения описательных процедур, актуализирующих использование содержательных общенаучных концепций, лежащих в основе функционирования различных модификаций инженерных систем [12, с. 35–39].

В процессе проводимого исследования нами высказано предположение, что наибольшую валидность для организации процедуры прогностики имеют так называемые вторичные диагностические параметры как характеристики процессов, протекающих в объекте диагностирования и являющихся функциями первичных диагностических признаков. Наиболее эффективно выявить такие параметры позволяют аналитические модели, сформированные в виде дифференциальных уравнений. Особенная функциональность применения дифференциально-интегрального исчисления в области исследований теории корабля обусловлена конституированием фундаментальной базы классической механики в качестве инвариантного знания ядра строительной механики корабля (СМК). Научный метод классической механики как методология исследования поведения технических систем путем составления и анализа дифференциальных уравнений движения выступает в качестве инструмента СМК и формирует целеполагание большинства теоретических и экспериментальных исследований в области диагностики технического состояния объектов морской техники.

*Цель статьи* – демонстрация применения научного метода классической механики для процедуры формирования математической модели объекта морской инфраструктуры в виде дифференциальных уравнений и подборе на этой основе параметров прогностической диагностики.

## **Материал и методы исследования**

*Объектом исследования* выбрана погружная конструкция, выполняющая функции подводного плавательного аппарата (ПА).

Качества ПА зависят в основном от совершенства системы погружение-всплытие. *Предметом исследования* выступает комплекс дифференциальных уравнений, описывающих процесс погружения-всплытия, их разрешение по отношению к базовым параметрам диагностики ПА. В качестве технологического принципа организации движения ПА рассматривается регулирование запаса плавучести.

*Общенаучная база* исследования сформирована фундаментальными представлениями теоретической механики о параметрах диагностики механических систем и их оценки посредством теорем динамики; вычислительными методами математического моделирования, образующими содержание аналитических и численных процедур составления и решения дифференциальных уравнений динамики. Данный теоретический фундамент как методологическая регулятивная система инженерных исследований регламентирует выдвижение содержательных гипотез и установление математических закономерностей для описания поведения технических систем, позволяет организовать комплексный подход к решению инженерной задачи технического диагностирования.

В качестве *исследовательских методов* применены реферативный анализ специфики методик технического диагностирования объектов морской инфраструктуры; структурно-логический анализ разработанных математических моделей для выявления обобщенных диагностических признаков; анализ действующих государственных стандартов в области надежности морской техники для формирования понятийного тезауруса.

*Принятые обозначения:* в записи уравнений все векторные величины обозначаются жирным шрифтом, скалярные величины – нежирным шрифтом.

## Моделирование

При решении задач строительной механики корабля используется оптимизационный подход к построению математической модели объекта морской техники, предполагающий выявление и учет только базовых силовых факторов. Упрощенная схема конструкции позволяет значительно уменьшить фактор случайности внешних воздействий (морские течения, волны, ветер) и внутренних напряжений (физико-механические свойства конструкции). Наиболее эффективной является аналитическая модель, в которой отсутствует зависимость будущего технического состояния от случайных помех и погрешностей измерения [10]. Тем самым задача формирования аналитической модели погружной конструкции, в первую очередь, должна решаться в направлении обоснования принимаемых идеализаций и предположений ее существования.

Для построения модели движения постулируется однородность оболочки ПА, что позволяет считать положение центра масс постоянным, совпадающим с геометрическим центром оболочки (центром инерции), а сам ПА – материальной точкой. Следует отметить, что при движении в толще жидкости удобнее управлять объектом, у которого центр масс системы не изменяется и находится в центре давления [6]. Естественнонаучная идеализация объекта путем представления в виде материальной точки со сконцентрированной в ней всей массой ПА позволяет представить модель движения в виде дифференциального уравнения, задающего аналитическую форму теоремы о движении центра масс механической системы. В левую часть этого уравнения помещена производная по времени от закона перемещения центра инерции механизма с коэффициентом, характеризующим инерционные свойства системы (масса). Правую часть формирует аналитическое выражение, отражающее комплекс внешних взаимодействий ПА.

Задача формирования комплекса внешних взаимодействий как базового фактора, определяющего характер поведения объекта, достаточно универсально решена в рамках модели идеальной жидкости, позволяющей считать вязкость неопределяющим фактором рассматриваемой среды и пренебрегать действием на ПА всех диссипативных сил и процессов - теплопроводность, электрическое сопротивление и др. В общем случае взаимодействие аппарата со средой описывается гидростатическими и гидродинамическими силами. К гидростатической

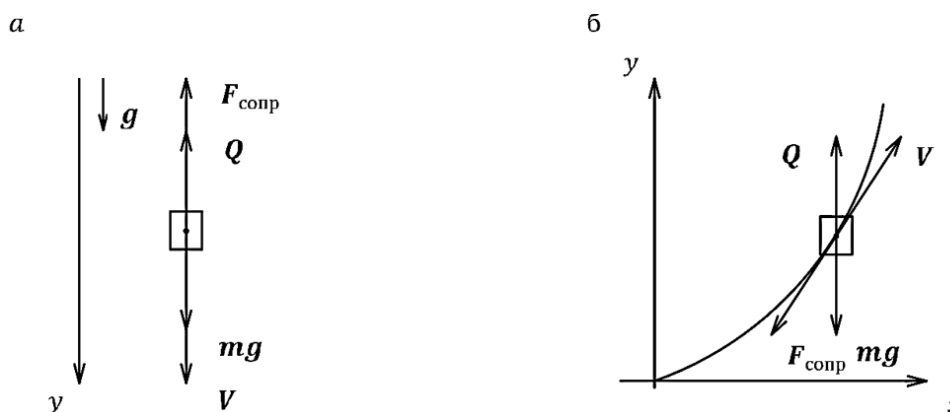
силе относят остаточную плавучесть, которая описывает разницу между действительным и расчетным запасом плавучести. К гидродинамическим воздействиям относятся силы вязкого сопротивления и инерционные силы, обусловленные присоединенными массами жидкости. Модель идеальной жидкости позволяет ввести следующее допущение: ПА, рассматриваемый как материальная точка, движется в идеальной жидкости под действием внешних гидростатических сил, к которым добавляется только сила сопротивления воды, характеризующаяся динамической вязкостью [7]. Такой подход унифицировал сложную задачу «выяснения отношений» с гидродинамическими взаимодействиями.

Формирование аналитической модели ПА в виде дифференциальных уравнений и их разрешение по отношению к характеристикам процессов, протекающих в ПА, необходимо организовать как самостоятельные задачи *погружение* и *всплытие*, что обусловлено различием начальных условий. Под разрешением дифференциальных уравнений будем понимать предоставление схемы получения общих и частных решений, не предполагающее включения в содержание работы всей процедуры математических выкладок.

### 1. Математическая модель ПА в режиме погружение

*Начальные условия.* Погружной аппарат, не имевший хода, получив небольшую отрицательную плавучесть  $p$ , погружается на глубину, двигаясь поступательно. Будем считать режим погружения определенным, то есть осуществляемым в соответствии с установленными Регистром морского судоходства правилами эксплуатации ПА – погружение преимущественно в ламинарном потоке жидкости (*спокойная вода*). Сопротивление воды  $F_{\text{сопр}}$  при этом принимается пропорциональным первой степени скорости движения и равным  $kSV$ , где  $k$  – коэффициент динамической вязкости,  $S$  – площадь горизонтальной проекции ПА,  $V$  – величина скорости погружения. Масса ПА равна  $m$ .

*Аналитическая форма математической модели.* Представим ПА в виде простой одно-массовой системы, на которую действуют вес  $mg$ , выталкивающая (архимедова) сила  $Q$ , сила сопротивления воды  $F_{\text{сопр}}$ . Распределение внешних силовых факторов в режиме *погружение* представлено на рис. 1а. Отрицательная плавучесть  $p$  представляет собой разницу между весом  $mg$  и выталкивающей силой  $Q$ , которая при погружении значительно меньше гидростатического давления.



**Рис. 1. Распределение внешних силовых факторов погружного аппарата: а – режим погружение; б – режим всплытие**

Для исследования поведения ПА воспользуемся базовым знанием классической механики о диагностике движения центра масс механической системы посредством теоремы о движении центра инерции:

$$m\dot{V} = F,$$

где  $m$  – масса механической системы;  $\dot{V}$  – ускорение центра масс;  $F$  – главный вектор внешних сил.

В режиме погружения центр масс ПА перемещается по отношению к оси  $y$ , что опишем следующим дифференциальным уравнением как аналитической формой теоремы о движении центра инерции механической системы:

$$m\dot{V} = p - F_{\text{сопр}} = p - kSV. \quad (1)$$

Для нахождения общего решения этого уравнения необходимо воспользоваться формулой Бернулли как методом замены переменной (дифференциальное уравнение Бернулли  $y' + p(x) \cdot y = q(x)$ ). В результате первичного интегрирования получим закон изменения скорости погружения ПА:

$$V(t) = C_0 \exp\left\{-\frac{k \cdot S}{m} t\right\} + \frac{p}{k \cdot S}. \quad (2)$$

Константу  $C_0$  найдем из начального условия  $V(0) = 0$ :

$$C_0 = -\frac{p}{k \cdot S}.$$

Тогда конкретная аналитическая зависимость скорости погружения ПА имеет вид

$$V(t) = \frac{p}{k \cdot S} \left(1 - \exp\left\{-\frac{k \cdot S}{m} t\right\}\right). \quad (3)$$

Интегрируя формулу (3) по времени, получаем путь, пройденный погружающимся аппаратом за время  $T$ :

$$y(t) = \int_0^T V(t) dt = \frac{p}{k \cdot S} \left[T - \frac{m}{k \cdot S} \left(1 - \exp\left\{-\frac{k \cdot S}{m} T\right\}\right)\right]. \quad (4)$$

Данное выражение как частное решение дифференциального уравнения (1) представляет собой закон движения центра инерции ПА при погружении.

## 2. Математическая модель ПА в режиме всплытие

*Начальные условия.* Погружной аппарат, имевший горизонтальный ход на некоторой глубине с постоянной скоростью  $V_0$ , получает положительную плавучесть. Двигаясь по инерции, ПА всплывает по некоторой криволинейной траектории. Будем считать режим всплытия неопределенным, что обусловлено множественностью случайных факторов сплошной среды (эффект турбулентности, плотность и температура воды). Поэтому величину силы сопротивления воды целесообразно записать обобщенной формулой  $F_{\text{сопр}} = kSV^\alpha$ , где степень  $\alpha$  – характеристика режима движения жидкости (ламинарность-турбулентность). Выталкивающая сила  $Q$  при погружении значительно больше гидростатического давления. Распределение внешних силовых факторов в режиме *всплытие* представлено на рис. 1б.

### *Аналитическая форма математической модели*

При движении объекта по криволинейной траектории векторное выражение теоремы о движении центра масс необходимо представить в проекциях на оси  $x$  и  $y$ , что обусловлено физическим смыслом ускорения точки как векторной величины. Поскольку вектор скорости всегда направлен по касательной к траектории движения, силу сопротивления воды  $F_{\text{сопр}}$  в выбранной системе координат представим следующим образом:

$$F_{\text{сопр}} = -\frac{V}{|V|} \cdot k \cdot S \cdot |V|^2 = \frac{-(\dot{x}i + \dot{y}j)}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} \cdot k \cdot S \cdot (\dot{x}^2 + \dot{y}^2)^{\frac{\alpha}{2}} - \frac{k \cdot S \cdot (\dot{x}i + \dot{y}j)}{(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)^{\frac{1-\alpha}{2}}}, \quad (5)$$

где  $\dot{x}$  – закон изменения скорости ПА по отношению к оси  $x$ ;  $\dot{y}$  – закон изменения скорости ПА по отношению к оси  $y$ .

Составляя теорему о движении центра масс в заданных координатных осях, получаем систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = -\dot{x} \cdot k \cdot S \cdot (\dot{x}^2 + \dot{y}^2)^{\frac{\alpha-1}{2}}, \\ m\ddot{y} = p - \dot{y} \cdot k \cdot S \cdot (\dot{x}^2 + \dot{y}^2)^{\frac{\alpha-1}{2}}. \end{cases} \quad (6)$$

Характер дифференциальных уравнений (6) говорит о невозможности их аналитического разрешения (интегрирования) без привлечения средств программного обеспечения. Вместе с тем численный метод решения подобных задач, понимаемый как метод Эйлера, позволяет найти приближенное значение функций  $x$  и  $y$  в узловых точках. Под узловыми точками подразумеваются временные интервалы, через которые ищем значения функций. Переписывая систему (6) в конечных разностях, получаем общие решения дифференциальных уравнений в виде:

$$\begin{cases} x = -\frac{m}{k \cdot S} \cdot \exp\left(C_1 - \frac{k \cdot S}{m} t\right) + D_1 \\ y = \frac{p}{k \cdot S} t - \frac{m}{k \cdot S} \cdot C_2 \cdot \exp\left(-\frac{k \cdot S}{m} t\right) + D_2 \end{cases}, \quad (7)$$

где  $D_1$  и  $D_2$  – обобщенные постоянные интегрирования, характеризующие начальные условия движения в соответствующей узловой точке.

В результате формирования аналитических форм математической модели ПА в режимах погружение-всплытие как системы дифференциальных уравнений (1) и (6) и их решения по отношению к закону перемещения центра инерции получены *основные уравнения рабочего процесса ПА* (3), (4), (6), (7). Структурно-логический анализ данных уравнений позволяет решить задачу подбора параметров прогностической диагностики погружного аппарата.

### Результаты исследования и их обсуждение

Основные уравнения рабочего процесса как частные решения дифференциальных уравнений движения ПА представляют собой формализованное описание связи между параметрами технического состояния (ПТС) и обобщенными диагностическими признаками (ОДП). Комплекс ПТС образуют физические величины, количественно характеризующие основные свойства исследуемого объекта и относящиеся к разряду *первичных* диагностических признаков – величина запаса плавучести  $p$ ,  $k$  – коэффициент динамической вязкости,  $S$  – площадь горизонтальной проекции ПА,  $\alpha$  – характеристика режима движения жидкости. К комплексу ОДП следует отнести характеристики инерционных и кинематических свойств ПА, формирующие содержание левых частей основных уравнений рабочего процесса и являющиеся функциями ПТС – траектория движения ПА, скоростные и временные параметры. Тем самым комплекс ОДП образуют *вторичные* диагностические параметры как характеристики процессов, протекающих в ПА.

Такая конструкция математической модели носит выраженный неявный характер, что свойственно для задач прогностической диагностики. Неявность модели связывается с наличием математического описания одного технического состояния и способа получения описаний других технических состояний на основе полученного математического уравнения. Аналитические зависимости между ОДП и ПТС позволяют сформировать дискретное множество обобщенных диагностических параметров как совокупность кривых, отражающих динамику изменения ОДП в зависимости от процесса изменения первичных параметров состояния. С этой целью целесообразно использовать готовые программные продукты, такие как MathGrapher и Math Mechanics.

Наличие кривых ОДП дает возможность построить эволюционную модель процесса изменения обобщенных технических характеристик ПА, что наиболее эффективно, на наш взгляд, реализует идею задач прогнозирования. Работа с графической картиной динамики ОДП решает проблему эмпирического подбора критериев годности и установления их предельного значения. Такой подход позволяет как управлять периодичностью диагностики объекта, так и организовать процедуру индивидуального прогнозирования технического состояния ПА и, соответственно, «обслуживание объекта по состоянию».

Совершенно очевидно неявная математическая модель определяет исправное состояние объекта. Обнаружить неисправность можно в том случае, если зафиксирована «патология» инерционных или кинематических характеристик ПА. Алгоритм постановки диагноза

неисправных технических состояний необходимо формировать на основе модели исправного состояния и правил, связывающих конкретную неисправность (первичные диагностические параметры) с обобщенными диагностическими признаками. К таким правилам относят процедуру работы с множественностью кривых ОДП, формирующую содержание *технологического аспекта* прогностической диагностики, предполагающего разработку соответствующих аппаратных и методических решений технического диагностирования.

### Заключение

Применение научного метода классической механики для формирования математической модели погружного аппарата позволило представить технологический процесс погружение-всплытие в виде аналитической формы дифференциальных уравнений. Полученные частные решения сформировали основные уравнения рабочего процесса ПА. Характерной особенностью данных уравнений является сконцентрированность первичных диагностируемых параметров как своеобразных коэффициентов влияния внешних воздействий в правой части уравнений рабочего процесса. Левые части уравнений отражают физическую сущность вторичных диагностических признаков как временных функций от первичных диагностических параметров (скорость, траектория движения, время как параметр конечных условий движения). Возможность исследования динамики объекта во времени, то есть в эволюции, позволяет отнести комплекс вторичных диагностических параметров к разряду обобщенных диагностических признаков как базовых параметров прогностической диагностики.

Представление математической модели погружного аппарата в виде дифференциальных уравнений формирует содержание *концептуального аспекта* прогностической диагностики ПА. При этом комплексно реализуются этапы физического анализа процессов, протекающих в ПА, формализованного построения диагностической модели и подбора параметров диагностики. Стремление к идеальной математической модели позволило исключить влияние на прогнозирующие параметры как гидродинамических сил, так и случайных функций – деградация физико-химических свойств объекта, погрешности измерения. Данные факторы технического состояния ПА предписывают к использованию при решении задач прогностики как методов совместного решения уравнений движения тела и уравнений Навье–Стокса, так и математической статистики в качестве способов идентификации образов. Однако такое «наиболее полное описание движения тела в жидкости» исключительно затратно с вычислительной точки зрения. Поэтому моделирование поведения ПА с учетом всех реальных условий целесообразно только при построении конечномерных моделей, которые оказываются более удобными при анализе управляемого движения.

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Биргер И.А. Техническая диагностика. Москва: URSS, 2019. 240 с.
2. Бигус Г.А., Даниев Ю.Ф., Быстрова Н.А., Галкин Д.И. Диагностика технических устройств. Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 615 с.
3. Жирабок А.Н., Яценко Н.А., Филатов А.Л., Павлов С.В. Диагностирование мехатронных систем непараметрическим методом на основе логико-динамического подхода // Вестник Инженерной школы ДВФУ. 2017. № 4(33). С. 29–36. DOI 10.5281/zenodo.1119155
4. Земляк В.Л., Васильев А.С., Козин В.М., Чингалаев С.А. Движение погруженного тела в приповерхностной водной среде при малой глубине дна // Вестник Инженерной школы ДВФУ. 2022. № 4(53). С. 13–22. DOI 10.24866/2227-6858/2022-4/13-22
5. Китаев М.В., Тюфтяев Д.В., Тортыжева Д.А. Математическая модель проектирования грузового судна // Вестник Инженерной школы ДВФУ. 2022. № 4(53). С. 42–58. DOI 10.24866/2227-6858/2022-4/42-58



6. Киселев Л.В., Медведев А.В. Сравнительный анализ и оптимизация динамических свойств автономных подводных роботов различных проектов и конфигураций // Подводные исследования и робототехника. 2012. № 1(13). С. 24–35. EDN: ROTNOH
7. Козлов В.В., Рамоданов С.М. О движении изменяемого тела в идеальной жидкости // Прикладная математика и механика. 2001. Т. 65. Вып. 4. С. 592–601.
8. Куценко Н.В., Грибиниченко М.В., Нитяговский А.В. Сравнительный анализ результатов численного и физического экспериментов по исследованию свойств радиальных подшипников с газовой смазкой // Вестник Инженерной школы ДВФУ. 2021. № 4(49). С. 21–27. DOI 10.24866/2227-6858/2021-4/21-27
9. Малкин В.С. Техническая диагностика. Москва: Лань, 2013. 272 с.
10. Родионов А.А. Направления развития строительной механики корабля, обеспечивающие повышение эффективности судов и объектов морской техники // Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. Спец. вып. 2. С. 15–24. DOI 10.24937/2542-2324-2018-2-S-I-15-24
11. Клюев В.В. Технические средства диагностирования: справочник. Москва: Машиностроение, 1989. 671 с.
12. Штагер Е.В. Дисциплинарная конвергенция инженерного вуза: монография. В 2 частях. Ч. 1. Концептуальный аспект. Владивосток: Изд-во Дальневост. федерал. ун-та, 2021. 88 с.
13. ANSYS CFX Solver Theory Guide. ANSYS Inc., Canonsburg, Pennsylvania, 2011. 270 p.
14. Burcher R., Rydill L. Concepts in Submarine Design. Cambridge, United Kingdom, Cambridge.

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2023. N 2/55

*Ship theory and structural mechanics*[www.dvfu.ru/en/vestnikis](http://www.dvfu.ru/en/vestnikis)

Original article

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2023-2/3-12>

Shtager E., Zatarinnaya T.

ELENA V. SHTAGER, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, [shtager.ev@dvfu.ru](mailto:shtager.ev@dvfu.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7663-4294>TAMARA A. ZATCARINNAYA, Student, [zatarinnaya.ta@students.dvfu.ru](mailto:zatarinnaya.ta@students.dvfu.ru)

Polytechnic Institute

*Far Eastern Federal University*

Vladivostok, Russia

### About one approach to the selection of parameters for the prognostic diagnosis of the submersible

**Abstract.** The actual task of the modern stage of engineering diagnostics is predictive diagnostics as a procedure for assessing the probable evolutionary states of an object. For technical forecasting, the problem of selecting prognostic parameters is very specific. The solution to this problem offers a prognostic diagnostic methodology that positions the mathematical model of the object under study as the basic basis for detecting diagnostic features. A multidimensional analysis of various approaches to the formalized description of marine engineering objects revealed a multivariance of the forms of mathematical models, which indicates the existence of a significant number of diagnosed parameters. At the same time, for the most part, the predictive value of such parameters is not justified. The purpose of the study is to demonstrate the use of the scientific method of classical mechanics to build a mathematical model of a differential type as a valid basis for selecting the parameters of predictive diagnostics of a marine infrastructure object. As a method the theorem of the movement of the center of inertia of a mechanical system is applied, the submersible design performing functions of the underwater swimming device acts as an object of a research. Technological process of immersion emergence is presented by an analytical form of the differential equations which private solutions created the equations of working process of the submersible device. Structural and logical analysis of particular solutions made it possible to substantiate the existence of a complex of primary diagnosed features as parameters of technical condition and a complex of generalized diagnostic features as temporary functions of primary parameters. The

possibility of studying the dynamics of an object over time, that is, in evolution, served as the basis for classifying the complex of generalized diagnostic features as basic parameters of prognostic diagnostics.

**Keywords:** objects of marine facilities, submersible device, mathematical model of a differential form, prognostics parameters

**For citation:** Shtager E., Zatcarinnaya T. About one approach to the selection of parameters for the prognostic diagnosis of the submersible. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2023;(2):3-12. (In Russ.).

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.  
The authors declare no conflict of interests.

## REFERENCES

1. Birger I. Technical diagnostics. Moscow, URSS, 2019. 240 p. (In Russ.).
2. Bigus G., Daniyev U., Bystrova N., Galkin D. Diagnostics of technical devices. Moscow, Publishing House of Bauman MSTU, 2014. 615 p. (In Russ.).
3. Zhirabok A., Yatsenko N., Filatov A., Pavlov S. Diagnosis in mechatronic systems by nonparametric method based on logic-dynamic approach. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2017;(4):29-36. (In Russ.). DOI 10.5281/zenodo.1119155
4. Zemlyak V., Vasilyev A., Kozin V., Chingalaev V. Movement of an immersed body in a near-surface water environment at a shallow bottom. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2022;(4):13-22. (In Russ.). DOI 10.24866/2227-6858/2024-4/13-22
5. Kitaev M., Tyuftyaev D., Tortyzheva D. Mathematical model for cargo vessel design. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2022;(4):42-58. (In Russ.). DOI 10.24866/2227-6858/2024-4/42-58
6. Kisel'jov L.V., Medvedev A.V. Comparative analysis and the optimization of the autonomous underwater robots dynamic properties of different projects and configurations. *Underwater Investigations and Robotics*. 2012;(1):24-35. (In Russ.).
7. Kozlov V., Ramodanov S. On the motion of a changeable body in an ideal fluid. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 2001;65(4):592-601. (In Russ.).
8. Kutsenko N., Gribinichenko M., Nityagovsky A. Comparative analysis of the results of numerical and physical experiments on study of gas-lubricated radial bearing properties. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2021;(4):21-27. (In Russ.). DOI 10.24866/2227-6858/2021-4/21-27
9. Malkin V. Technical diagnostics. Moscow, Lan Publishing House, 2013, 272 p. (In Russ.).
10. Rodionov A. Tendency of development of the ship structural mechanics for increasing of efficiency of ships and offshore structures. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2018;(S2):15-24. (In Russ.). DOI 10.24937/2542-2324-2018-2-S-I-15-24
11. Klyuev V. Technical means of diagnosing: reference book. Moscow, Mashinostroenie, 1989. 672 p. (In Russ.).
12. Shtager E. Disciplinary convergence of engineering university: monograph. In 2 parts. Part 1. Conceptual dimension. Vladivostok, Publishing House of FEFU, 2021. 88 p. (In Russ.).
13. ANSYS CFX Solver Theory Guide. ANSYS Inc., Canonsburg, Pennsylvania, 2011, 270 p.
14. Burcher R., Rydill L. Concepts in Submarine Design. Cambridge, United Kingdom, Cambridge.