

## ЗАГАЛЬНОНАУКОВІ ПРОБЛЕМИ РОЗВИТКУ ЗБРОЙНИХ СИЛ УКРАЇНИ

УДК 629.016:51-74

**В.В. Будашко<sup>1</sup>**, к.т.н., доц.

**О.А. Онищенко<sup>2</sup>**, д.т.н., проф.

**Е.А. Юшков<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Одесская национальная морская академия, г. Одесса, Украина

<sup>2</sup>Военная академия (г. Одесса), Украина

### ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПРОПУЛЬСИВНОГО КОМПЛЕКСА

*Выработаны основные подходы при создании физической модели судовой энергетической установки комбинированного пропульсивного комплекса с винтами противоположного вращения. Идентифицированы определяемые и определяющие критерии подобия и рассчитаны коэффициенты пропорциональности в зависимости от режимов работы. Приведены технические характеристики элементов модели.*

**Ключевые слова:** физическое моделирование, энергетическая установка, пропульсивный комплекс, винты противоположного вращения, критерий подобия

При исследовании процессов в судовых энергетических установках (СЭУ) комбинированных пропульсивных комплексов (КПК), применяющихся во всех современных типов суден, важнейшим этапом для проверки адекватности имитационных моделей реальным объектам и процессам, является создание реальных физических моделей, которые позволяют: а) максимально учесть основные физические процессы; б) воплотить спектр теории в практическую часть исследования; в) пренебречь второстепенными факторами, без потерь основной информационной составляющей исследования.

Получение верифицированной экспериментом имитационной модели позволит решить основную задачу моделирования – получение новых знаний (информации) в ходе модельных экспериментов, уже не с физическим объектом, а с его моделью.

Основной проблемой при создании физических «масштабируемых» моделей СЭУ и КПК является соблюдение гидродинамического подобия. В соответствии с теоремой подобия Кирпичева-Гухмана гидродинамические явления будут подобными, если они: 1) описываются одной системой дифференциальных уравнений; 2) имеют подобные условия однозначности; 3) имеют численно равные критерии подобия [1]. В частности, соблюдение только геометрического подобия недостаточно для независимости гидродинамических свойств от размеров.

Как известно, основными критериями гидродинамического подобия являются критерии Фруда, Рейнольдса, Эйлера и Струхала, которые учитывают влияние различных физических сил, действующих на физическую модель и реальный объект, а также характеризуют инерционные гидродинамические силы, возникающие при нестационарном движении жидкости. Практическая и физическая невозможность одновременного выполнения условий полного подобия заставляет искать частные критерии подобия, выражающие условия подобия в случае, когда в качестве преобладающей выступает одна из действующих сил [2].

Нарастающее внедрение в судах различного типа подруливающих устройств (ПУ) и азимутальных винто-рулевых установок (Азиподов), в зависимости от выполняемых судном

технологических задач, позволяет применять системы динамического позиционирования (*DP*) трёх типов [3].

В любом случае, создание физической модели судна, работающего в режиме *DP*, допускает рассмотрение гидродинамического подобия с преобладающим влиянием одной из действующих сил.

Удовлетворить соблюдение критериев Рейнольдса и Фруда для одной и той же среды и при моделировании, и в физической модели невозможно. Это объясняется тем, что при динамическом позиционировании судна, когда его скорость относительно поверхности воды равна нулю, преобладающим является критерий Фруда. Критерий Рейнольдса при этом несущественен и преобладает гидравлический процесс взаимодействия неподвижного судна с волнами и потоками, создаваемыми гребными винтами.

Если среда проведения эксперимента будет отличной от натурной, то одним из определяющих критериев может стать критерий Архимеда. А для отдельно взятого ПУ или Азипода, воздействующих друг на друга и на судно совместно при помощи упора винта, определяющим будет критерий Струхалия, как функция числа Рейнольдса, лежащего в диапазоне  $200 < Re < 200000$ , в котором число Струхалия постоянно:  $Sh = 0,2 \div 0,3$ . Применительно к разности упоров, характер такой зависимости остается постоянной для всех режимов обтекания корпуса в указанном выше диапазоне изменения чисел Рейнольдса. Это свидетельствует о доминирующей роли процесса вихреобразования в кормовой области плохообтекаемого корпуса (граничный случай – корпус судна расположен перпендикулярно потоку) в формировании поля давления на его поверхности, а значит и существенными энергетическими потерями.

Критерий Эйлера может быть определяющим в случае применения выдвигных или туннельных ПУ, что предполагает учёт и критерия Струхалия.

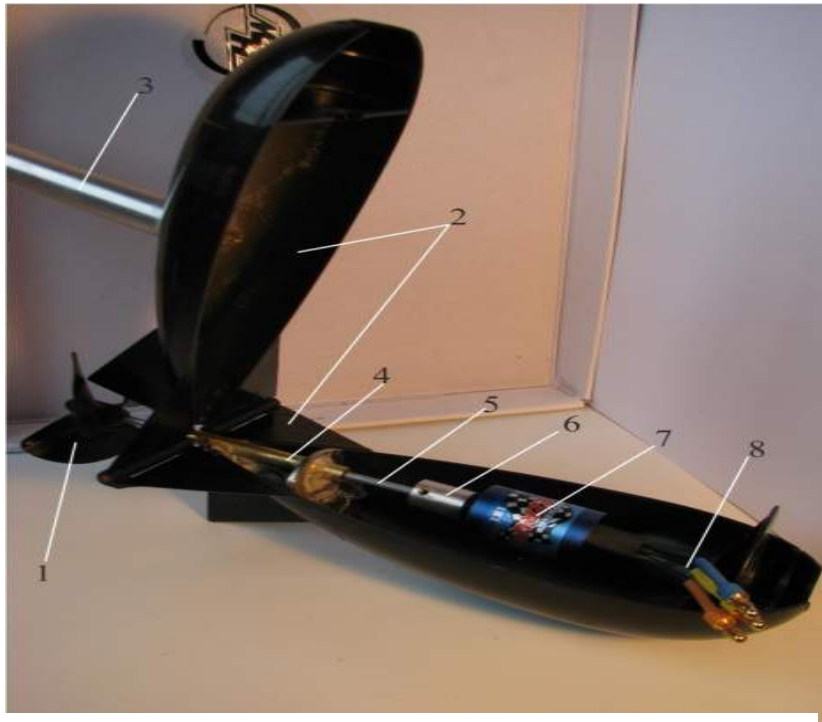
Исходя из изложенного и учитывая тот факт, что геометрическое подобие соблюдено в масштабируемой физической модели, а тип, форма и количество лопастей винта не являются определяющими для отдельно взятого ПУ или Азипода в составе СЭУ КПК, можно создать адекватную физическую модель. Создание такой модели возможно, если допустить, что все электрические и тепловые двигатели будут подобны реальным, и для них будут выдержаны главные константы подобия:  $l_u$  – масштаб скоростей;  $l_t$  – масштаб времени;  $l_q$  – масштаб массовых сил;  $l_e$  – масштаб всех линейных размерностей. Обеспечение подобия для среды будет возможным, если соблюсти:  $l_n$  – масштаб коэффициента кинематической вязкости и  $l_r$  – масштаб плотности; для туннельных или выдвигных ПУ соблюсти  $l_p$  – масштаб сил давлений.

В соответствии с  $l_e$ , для выбранного типа винта, были определены главные размеры корпуса модели судна из расчёта его водоизмещения  $D = 100000$  тонн и скорости движения в морской воде  $v = 22$  узла. Конструкция ПУ типа Азипод выполнена в виде обтекаемой гондолы пропорциональных размеров с дейдвудным устройством и баллером.

Соблюдая масштаб скоростей  $l_u$  установлены: редукторная передача для поворота баллера для обеспечения скорости перекадки с борта на борт примерно  $2^\circ/\text{сек}$  и электродвигатель с редукторной передачей для привода винта на  $0 \div 300$  об/мин, а для соблюдения масштаба массовых сил  $l_q$  корпус модели Азипода был пропорционально утяжелён свинцовым балластом (рис. 1).

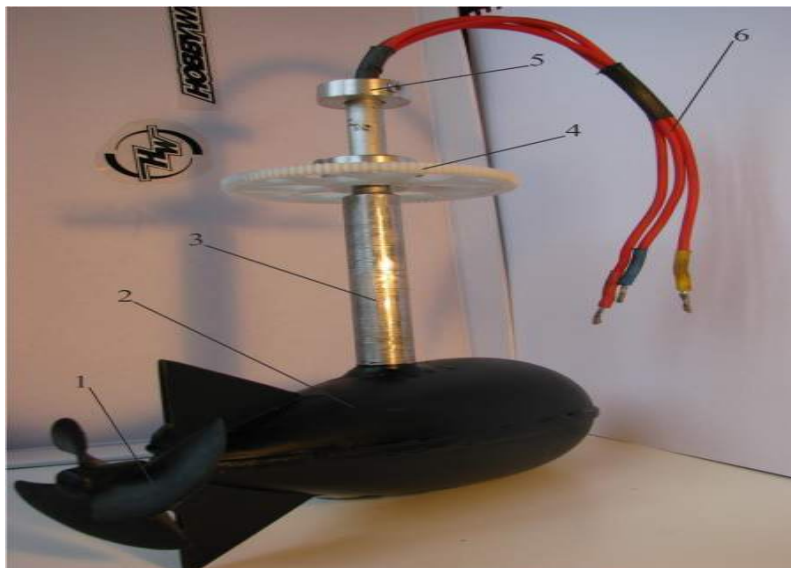
Электродвигатель получает питание по гибкому кабелю от программируемого контролера (преобразователя частоты, ПЧ, рис. 2), который обеспечивает необходимый диапазон регулирования момента и частоты вращения во всей координатной плоскости. Электродвигатель *Hobbywing EZRUN2030 18T 5200KV* – трёхфазный, бесколлекторный низкоомный, высокочастотный. Имеет следующие характеристики: частота вращения (об/мин)/напряжение (В), KV = 5200; номинальный ток – 18 А; пиковый ток – 50 А; питание – аккумулятор 4-9 *cells NiMH/NiCd*, 2-3S *LiPo*; BEC – линейный, 6 В/1 А; диаметр двигателя, мм – 20; длина (без вала), мм – 30; диаметр вала, мм – 2; длина вала, мм – 10. Электродвигатель питается от бесколлекторного регулятора *Hobbywing EZRUN*

18 А, який програмується при допомозі карти *Hobbywing XERUN/EZRUN*. Інструкція по експлуатації, підключенню і програмуванню контролера, а також по калібрувці діапазона каналів управління при першому включенні нового регулятора, при використанні регулятора с новим приймачем или при измененні нейтрального положення передатчика, а також других параметрів приведена в [4].



*1 – гребной винт; 2 – корпус; 3 – баллер; 4 – дейдвуд; 5 – вал; 6 – муфта; 7 – электродвигатель; 8 – кабель питания.*

**Рис. 1 – Модель Азипода в открытом состоянии:**



*1 – гребной винт; 2 – корпус; 3 – баллер; 4 – шестерня редуктора поворота; 5 – муфта ограничителя; 6 – кабель питания*

**Рисунок 2 – Физическая модель Азипода в собранном состоянии:**

Там же находятся схемы подключения сервопривода поворота баллера, источника питания и органов управления электроприводом винта, а также таблица выбора режимов работы регулятора в зависимости от требований технологического процесса.

Одной из наиболее перспективных концепций СЭУ КПК является гибридная судовая установка с винтами противоположного вращения (*Contra-Rotating Pod, CRP*), работающих в режиме *DP*, где преобладают гравитационные силы и действует закон подобия Фруда. Для соблюдения подобия Фруда необходимо равенство чисел  $Fr_M = Fr_H$  для модели и реального объекта, т.е. критерии подобия необходимо выражать через характерные для данного режима параметры.

В качестве характерного линейного размера при обтекания корпуса судна водой выбирают длину судна между перпендикулярами по ватерлинии и осадку в направлении потока, а в качестве характерной скорости – скорость набегания потока.

Критерий подобия Фруда для рассматриваемого случая получен из общего критерия гидродинамического подобия Ньютона, подставив в это уравнение силу тяжести,  $G = mg$ :

$$\frac{v_S^2}{g_S \cdot l_S} = \frac{v_M^2}{g_M \cdot l_M}, \quad (1)$$

где:  $v$  – скорость набегающего потока, м/с;  $g$  – сила тяжести, м/с<sup>2</sup>;  $l$  – длина, м; соответственно ( $S$ ) – судна и ( $M$ ) – модели.

Из равенства (1) требуется получение основных параметров всех возникающих потоков с учетом масштабов подобия. Вычислим, в какой зависимости находятся скорости, упоры и моменты для модели и судна в случае моделирования по закону Фруда.

Если для натуральных условий и условий испытания модели ускорения силы тяжести  $g_S \neq g_M$ , то из (1) следует:

$$\frac{v_S}{v_M} = \sqrt{\frac{l_S \cdot c_1}{l_M \cdot c_2}} = \sqrt{\lambda_{SM}}, \quad (2)$$

где:  $\rho_1, \rho_2$  – плотности сред, кг/м<sup>3</sup>, т.е. скорость модельного потока воды должна быть уменьшена в  $\sqrt{\lambda_{SM}}$  при условии соблюдения критерия Архимеда для натурной среды и среды моделирования.

Учёт возникновения кавитации осуществляется соблюдением критериев подобия  $Fr$ ,  $Re$  и равенством чисел  $Eu$  для модели и судна.

Так, упоры винтов модели и судна должны находиться в зависимости:

$$\frac{T_S}{T_M} = \frac{n_S \cdot v_S}{n_M \cdot v_M} = \lambda_{SM}^2 \sqrt{\lambda_{SM}} = \lambda_{SM}^{2.5}, \quad (3)$$

где  $n_S, n_M$  – частоты вращения гребных валов, об/мин. Если упор судового винта  $T_S$ , то на меньшей в  $\lambda_{SM}$  раз модели, упор винта должен быть меньше в  $\lambda_{SM}^{2.5}$  раз при условии соблюдения геометрических критериев подобия.

Отношение моментов на валах винтов, а следовательно и потребляемых приводными электродвигателями мощностей, учитывая соотношение (1) и (2), равно:

$$\frac{Q_S}{Q_M} = \frac{D_S \cdot v_S}{D_M \cdot v_M} = \lambda_{SM}^{2.5} \sqrt{\lambda_{SM}} = \lambda_{SM}^3, \quad (4)$$

где  $D_S, D_M$  – диаметры винтов, м;

Аналогично, используя линейный масштаб, можно выразить значения масштабных коэффициентов и для других параметров.

**Выводы:**

1. Определены основные соотношения для линейных и критериальных зависимостей, необходимые для создания уменьшенной в n-раз физической модели судна.
2. Созданы предпосылки для верификации имитационных моделей с помощью физического моделирования.
3. Созданная физическая модель судна позволяет производить натурные эксперименты, в частности – при исследовании систем динамического позиционирования судов различного технологического назначения.

**Список использованных источников**

1. Чижиумов, С. Д. Основы гидродинамики: учеб. пособие / С. Д. Чижиумов. – Комсомольск-на-Амуре : ГОУВПО «КнАГТУ», 2007. – 106 с.
2. Максимов, А. И. Модели и моделирование в научных исследованиях: учебное пособие по курсу «Методология научных исследований» / А. И. Максимов // ГОУВПО Иван. гос. хим.-технол. ун-т. : Иваново. – 2006. – 88 с.
3. Будашко, В. В. Удосконалення системи управління підрулюючим пристроєм комбінованого пропульсивного комплексу / В. В. Будашко, О. А. Онищенко // Вісник Національного технічного університету «ХПИ». Збірник наукових праць. Серія : Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. – Х. : НТУ «ХПИ». – 2014. – № 38 (1081). – 178 с.
4. User manual Ezrun series sensorless brushless speed controller for car and truck, Available at: [http://www.hobbywing.com/download\\_show.asp?id=79](http://www.hobbywing.com/download_show.asp?id=79) (accessed 05.11.2014).

**ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНОГО ПРОПУЛЬСИВНОГО КОМПЛЕКСУ**

В.В. Будашко, О.А. Онищенко, Е.А. Юшков

*Опрацьовано основні підходи при створенні фізичної моделі суднової енергетичної установки комбінованого пропульсивного комплексу з гвинтами протилежного обертання. Ідентифіковано критерії подібності визначальні та такі що визначаються, і розраховано коефіцієнти пропорційності в залежності від режимів роботи. Наведено технічні характеристики елементів моделі.*

**Ключові слова:** фізичне моделювання, енергетична установка, пропульсивний комплекс, гвинти протилежного обертання, критерій подібності

**PHYSICAL MODELING OF MULTI-PROPULSION COMPLEX**

V. Budashko, O. Onischenko, E. Yushkov

*The basic approaches when creating a physical model of the ship's power plant for combined propulsion complex with counter-rotating propellers are developed. The similarity criterions, which will determine and determining are identified, and coefficients of proportionality depending on operating conditions are calculated. The technical characteristics of the model elements are shows.*

**Keywords:** physical modeling, power plants, propulsion complex, counter-rotating propellers, similarity criterion