

Войченко Т.О.Дунайський інститут водного транспорту
Державного університету інфраструктури та технологій**Тришин В.В.**Дунайський інститут водного транспорту
Державного університету інфраструктури та технологій**Рященко О.І.**Дунайський інститут водного транспорту
Державного університету інфраструктури та технологій**Лісовський С.В.**Дунайський інститут водного транспорту
Державного університету інфраструктури та технологій

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОБЛЕМ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПРОПУЛЬСИВНИХ КОМПЛЕКСІВ СУДЕН З НАПІВЗАНУРЮВАЛЬНИМИ ГВИНТАМИ

Метою роботи є дослідження проблем технічної експлуатації пропульсивних комплексів суден з напівзанурювальними гвинтами з подальшою побудовою діаграми «аналізу кореневих причин» (діаграми Ішикави). Поставлена мета досягається шляхом, по-перше, аналізу основних типів приводів маломірних швидкісних суден з точки зору їх розміщення, побудови, переваг та недоліків; по-друге, аналізу завантаженості суден із напівзанурювальними гвинтами з початку їх експлуатації; по-третє, шляхом аналізу процентного співвідношення характерних відмов і несправностей основних функціональних вузлів пропульсивного комплексу швидкісних суден із напівзанурювальними гвинтами. Проведений аналіз основних типів приводів маломірних швидкісних суден дозволив встановити особливості побудови приводу та його позитивні та негативні сторони. Встановлено, що на кордоні води і повітря, де різко падає опір, привід Арнесона з напівзанурювальними гвинтами вважається найпоширенішим. Це забезпечує суттєве зростання швидкості і зниження витрати палива, зменшення осадки судна а також вирішення проблеми кавітації. Тому судна з напівзанурювальними гвинтами найширше застосовуються для виконання пасажирських перевезень і спеціальних завдань, пов'язаних з патрулюванням, охороною державного кордону, пошуком браконьєрів тощо. Результати аналізу показали, що середній час напрацювання їх не перевищує 50% від загального фонду робочого часу; основні режими роботи головного двигуна з використанням напівзанурювальних гвинтів складають близько 80% від загального часу роботи двигунів; тривалість завантаженості судів у літній період практично в 3 рази перевищує завантаженість у зимовий період та найбільший процент несправностей основних функціональних вузлів пропульсивного комплексу мають несправності системи гідроуправління. Найважливішим результатом досліджень є побудована діаграма Ішикави несправностей основних функціональних вузлів пропульсивного комплексу з напівзанурювальними гвинтами. Таким чином, розроблена діаграма надає можливість виявити ключові взаємозв'язки між різними факторами та більш достеменно зрозуміти досліджуваний процес.

Ключові слова: експлуатація, судно, пропульсивний комплекс, частково занурені гвинти, аналіз, діаграма.

Постановка проблеми. На даний одними з найбільш ефективних малих суден (катерів) є судна з напівзанурювальними гвинтами, які отримали широке застосування як для виконання спеціальних завдань (патрулювання, охорона державного кордону, пошук браконьєрів), так і для пасажирських перевезень.

Напівзанурювальні гвинти є складовими елементами відповідного пропульсивного комплексу, до складу якого входять також головні двигуни, реверс-редуктори, торсіонні вали та інші елементи.

У процесі експлуатації цих швидкісних суден із напівзанурювальними гвинтами виникають

різноманітні відмови та несправності. Своєчасне виявлення відповідних несправностей є запорукою безпечного використання суден. У зв'язку з цим, як проектувальники, так й експлуатанти повинні знати причини виникнення несправностей і забезпечити такий комплекс технічних та організаційно-методичних заходів, який дозволить забезпечити або їх попередження або мінімізацію збитків від них. Тому дослідження проблем технічної експлуатації пропульсивних комплексів суден з напівзанурювальними гвинтами з подальшою побудовою відповідної діаграми «аналізу кореневих причин» є актуальним науковим завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням дослідження підходів щодо аналізу, проектування, побудови як швидкісних суден у цілому, так і їх пропульсивних комплексів присвячена значна кількість робіт, наприклад [1-8].

Так в роботі [1] визначено, що потреба у збільшенні швидкості середніх і великих суден ставить конструктора перед необхідністю вибору пропульсивних систем, які економічно задовольняють вимогам продуктивності на дедалі ширших експлуатаційних профілях. Сукупність гідродинамічних характеристик корпусу і рушіїв призводить до залежності швидкості від тяги для умов, в яких працює судно. Це співвідношення швидкості і тяги вимагає унікальних значень потужності і числа обертів для кожного типу і кількості рушіїв. Потужність і число обертів також чутливі до режиму роботи судна: постійна швидкість, прискорення до більшої швидкості або буксирування об'єкта. На більшості суден використовуються заглибні гребні гвинти з фіксованим кроком. Надводні гребні гвинти встановлюють на суднах, призначених для роботи на дуже високих швидкостях, а водометні рушії все частіше використовують на більших суднах із високошвидкісним профілем роботи. У цій статті розглядаються співвідношення гальмівної потужності (brake horsepower, BHP) і числа обертів гребного гвинта для вимог до швидкості судна на основі гідродинамічних характеристик трьох типів гребних гвинтів: заглибних, поверхневих і водометних. Наведено приклад прогнозованих характеристик судна щодо швидкості, потужності та числа обертів гребного гвинта, який охоплює характеристики двигуна і співвідношення BHP і числа обертів. Останній формат показує відмінності в потрібній потужності для трьох типів рушіїв на однокорпусному судні з урахуванням характеристик двигуна.

Наприклад, в роботі [2] було встановлено, що кавітація лопатей гребного гвинта на високошвидкісних суднах знижує ефективність роботи гвинта, оскільки призводить до ерозії та корозії лопатей, наведеної вібрації та шуму. Це призводить до неефективності гребного гвинта для підвісного двигуна і далі до розтрата пального, високого споживання енергії, шкідливих викидів та аварій на суднах. Дослідники показали, що пошкоджений гребний гвинт знижує продуктивність підвісної силової установки при передачі потужності для руху човна вперед. Такі характеристики гребного гвинта на відкритій воді успішно поліпшуються за допомогою рівняння Нав'є-Стокса з усередненням Рейнольдса (RANS), розв'язуваного за допомогою моделювання усталеного режиму в комерційному коді обчислювальної гідродинаміки (CFD) STAR-CCM+. У цьому дослідженні продуктивність гребного гвинта на відкритій воді оцінювали на основі впливу кількості лопатей і відношення кроку до діаметра (P/D). Чисельні результати показали, що зміна кількості лопатей призводить до збільшення ефективності більш ніж на 6% для гвинта з трьома лопатями, який мав найкращі характеристики гребного гвинта на відкритій воді. Результати також засвідчили, що відношення кроку до діаметра спричинило збільшення ефективності приблизно на 15% для найвищого P/D , що дорівнює 1,6. Це призвело до поліпшення характеристик підвісного морського гвинта, зменшення кавітації лопатей і зниження витрати палива.

В статті [3] представлено попередній аналіз, присвячений розробленню концепції нового швидкохідного судна, що відрізняється від типових морських суден, здатного розвивати дуже високу швидкість, незважаючи на свої основні розміри і водотоннажність. Зокрема, аналіз зосереджений на «глибоких V-подібних корпусах» загальною довжиною близько 40 м і діапазоном робочих швидкостей до 60 вузлів. На етапі проектування нового концептуального човна може виникнути безліч проблем. Крім класичних проблем проектування, добре вивчених у військово-морській архітектурі, виникають нові питання й особливості для такого типу дуже швидкісних суден. Одна з таких нових проблем пов'язана з оцінкою кривої опору на спокійній воді, для якої наявність даних і надійних методик має бути глибоко вивчена у зв'язку з аналізованими екстремальними умовами. Правильний прогноз опору є ключовим моментом, наприклад, для оцінювання встановленої на борту потужності,

необхідної для досягнення необхідної максимальної швидкості, і, зі свого боку, для оцінювання загальної ваги човна (оскільки головний двигун є одним із найвагоміших чинників) з урахуванням його сильного впливу на диференціювання човна, а отже, і на опір.

Постановка завдання. Мета роботи полягає у дослідженні проблем технічної експлуатації пропульсивних комплексів суден з напівзанурювальними гвинтами з подальшою побудовою відповідної діаграми «аналізу кореневих причин».

Виклад основного матеріалу. Основні типи приводів на сучасному ринку маломірних швидкісних суден наведено в табл. 1.

Привід Арнесона – найпопулярніший з напівзанурювальними гвинтами (НЗГ), що працюють не у воді, а на кордоні води і повітря, через що різко падає опір. Швидкість при цьому зростає на 15-30%, а витрата палива знижується. За рахунок того, що гвинти йдуть не під днище, а за корму, зменшується осадка судна. Крім того, знімається проблема кавітації, актуальна для повністю занурених гвинтів на швидкостях понад 40 вузлів: спочатку через високу швидкість обертання поверхня гвинта починає активно руйнуватися під впливом бульбашок, що утворюються в потоці води. Надалі, коли ці бульбашки, зливаючись, утворюють заповнені водяною парою каверни, упор знижується і ККД гвинта падає на 10-20%. Основним методом боротьби з кавітацією є збільшення площі лопатей і їхнє спеціальне профілювання – саме цим характеризуються напівзаглибні гвинти, які використовуються з приводом Арнесона. Нарешті, більша частина такого приводу перебуває за бортом, звільняючи дефіцитний простір усередині корпусу.

У зв'язку саме з цим судна з НЗГ отримали широке застосування як для виконання спеціальних завдань (патрулювання, охорона державного кордону, пошук браконьєрів), так і для пасажирських перевезень. На рис. 1 наведені основні функціональні вузли пропульсивного комплексу швидкісних судів на основі приводу Арнесона з НЗГ.

Особливістю таких судів є два режими руху: водотонажний (ВР) та глісуючий режим (ГР). Вихід судна на ГР відбувається при досягненні необхідних параметрів руху і зміни положення кута установки НЗГ.

Аналіз завантаженості суден із НЗГ з початку їх експлуатації (наприклад, Pershing 5X, Pershing 6X, Pershing 8X), показав, що середній час напруження не перевищує 50% від загального фонду

робочого часу (рис. 2). Це викликано, в першу чергу, як погодними умовами, так і існуючою складністю в організації сервісного обслуговування.

Дані за часом роботи головного двигуна (ГД) на різних режимах приводяться на діаграмі (рис. 3).

Основні режими роботи ГД від 1700 до 2400 хв⁻¹ складають близько 80% від загального часу роботи двигунів. Тривалість завантаженості суден у літній період практично в 3 рази вище завантаженості у зимовий період, що пов'язано з основним режимом їх роботи – перевезення пасажирів.

Для аналізу відмов та несправностей пропульсивного комплексу (ПК) із НЗГ виділимо основні функціональні вузли (див. рис. 1): корпус судна, головний двигун, еластична муфта, торсіонний вал, опорно-зав'язаний підшипник, гребний гвинт та система гідроправління.

На діаграмі (рис. 4) наведене процентне співвідношення характерних відмов і несправностей основних функціональних вузлів ПК швидкісних судів із НЗГ. Аналіз процентного співвідношення характерних відмов і несправностей основних функціональних вузлів ПК швидкісних судів із НЗГ показує, що найбільший процент мають несправності системи гідроправління – більше ніж 50%.

Приклад несправностей основних функціональних вузлів пропульсивного комплексу з НЗГ наведені в табл. 2.

За результатами проведеного аналізу пропонується побудувати діаграму Ішікави несправностей основних функціональних вузлів пропульсивного комплексу з НЗГ.

Діаграма Ішікави – відома як діаграма «риб'ячої кістки» (Fishbone Diagram) або «причиново-наслідкова» діаграма (Cause and Effect Diagram), а також як діаграма «аналізу кореневих причин». Діаграма Ішікави представляє собою один з семи основних інструментів вимірювання, оцінювання, контролю та покращення якості виробничих процесів, що входять до «родини інструментів контролю якості» [9].

Така діаграма надає можливість виявити ключові взаємозв'язки між різними факторами та більш достеменно зрозуміти досліджуваний процес. Діаграма сприяє визначенню головних чинників, які спричиняють найзначніший внесок до проблеми, що розглядається, та попередженню або усуненню їх дії.

На рис. 5 наведена запропонована у роботі діаграма Ішікави несправностей основних функціональних вузлів ПК з НЗГ.

Основні типи приводів маломірних швидкісних суден

№ з/п	Назва приводу	Розміщення приводу	Особливості побудови приводу	Плюси та мінуси приводу
1	Привід на вал (Shaft drive)		Двигун обертає вал, на кінці якого закріплений гребний гвинт. Позаду гвинта перо керма, що спрямовує потік води	Плюси: простота, надійність і досить ефективна витрата палива. Мінуси: на невеликих і середньорозмірних судах машинне відділення займає найширшу ділянку нижньої палуби
2	Кутовий привід (V-drive)		Двигун встановлюють у кормі, а вал розділений на 2 частини: перша йде вперед, з'єднуючись з редуктором, друга йде назад від редуктора і закінчується гвинтом	Плюси: простота і надійність; невимогливість до сервісу; широкий діапазон використання; високий ККД на низьких швидкостях; хороша курсова стійкість Мінуси: уразливість валолінії під час зіткнення з підводними перешкодами і плаваючими об'єктами; значна осадка судна; зниження ККД при збільшенні швидкості
3	Поворотно-откидні колонки (Sterndrive)		Гібрид стаціонарного і підвісного мотора	Плюси: висока маневреність і керованість; низька витрата палива; компактний моторний відсік; встановлюється з бензиновими і дизельними двигунами; багатий вибір гребних гвинтів. Мінуси: невеликий ресурс; не підходять для водотонажних суден – тільки тих, що глісують, невеликого і середнього розміру
4	Днищеві колонки (Pod Drive)		Встановлюються не на транці, а на днищі яхти. Кожна з пар колонок повертається незалежно	Плюси: велика маневреність і швидкість; економічна витрата палива; низький рівень шуму і вібрації; суперкомпактний моторний відсік. Мінуси: досить дороге обслуговування і вимогливість до рівня сервісу; збільшена осадка; вимагають особливої конфігурації днища
5	Водомет (Water Jet)		Відсутність гвинтів і будь-яких інших обертових частин	Плюси: висока керованість і маневреність; можливість екстреного гальмування; мала осадка; не передає вібрацію на корпус. Мінуси: може забиватися водоростями і дрібним камінням; якщо човен не використовується, нутрощі водомета швидко обростають, що призводить до значної втрати швидкості
6	Привід Арнесона (Arneson Drive, surface drive)		Вал гребного гвинта поміщається в тунелі в корпусі судна і виходить за транець, закінчуючись великим гвинтом з особливим профілюванням лопатей	Плюси: дуже висока швидкість при зниженні витрати палива; можливість регулювання осадку; зменшується шум і передача вібрацій на корпус. Мінуси: висока вартість купівлі та обслуговування



основних функціональних вузлів пропульсивного комплексу з НЗГ.

За результатами аналізу завантаженості суден із напівзанурювальними гвинтами з початку їх експлуатації визначено, що середній час напруження їх не перевищує 50% від загального фонду робочого часу. Визначено, що основні

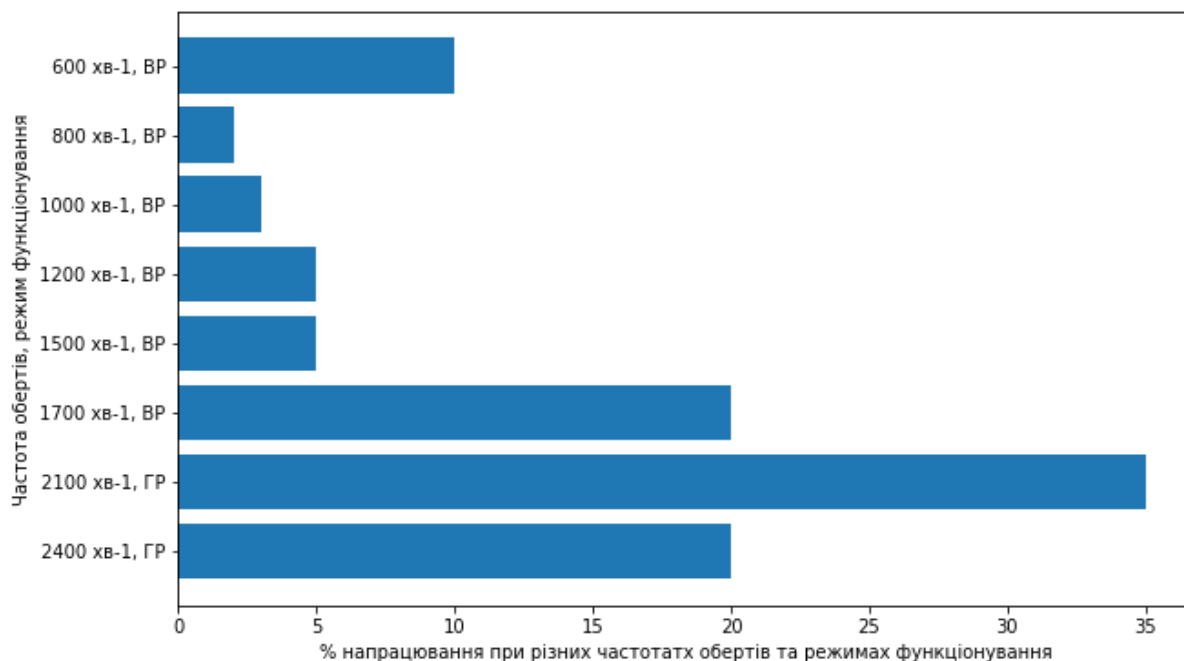


Рис. 3. Час експлуатації ГД на різних режимах роботи

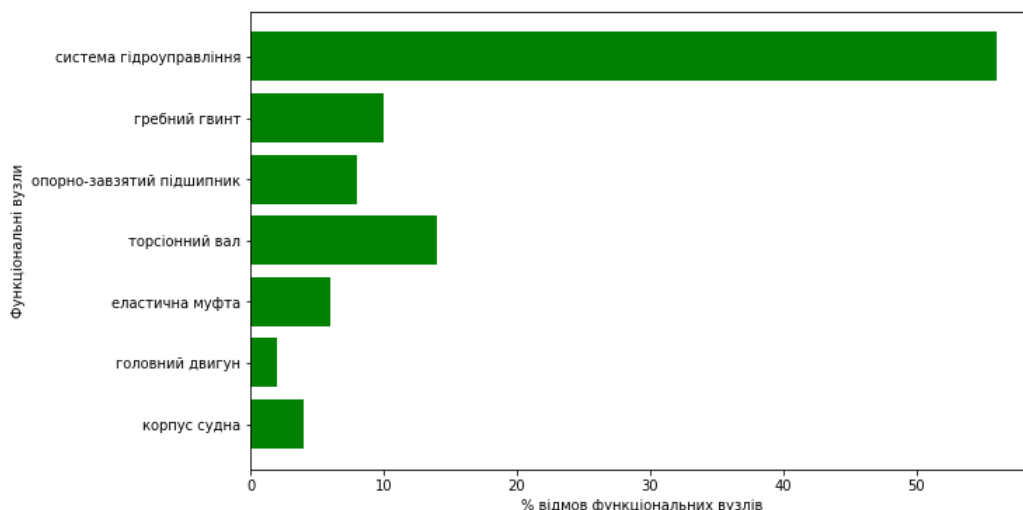


Рис. 4. Несправності основних функціональних вузлів пропульсивного комплексу з НЗГ

режими роботи головного двигуна з використанням напівзанурювальних гвинтів (від 1700 до 2400 хв⁻¹) складають близько 80% від загального часу роботи двигунів. Тривалість завантаженості судів у літній період практично в 3 рази перевищує завантаженість у зимовий період.

Результати аналізу процентного співвідношення характерних відмов і несправностей основних функціональних вузлів пропульсивного комплексу швидкісних судів із напівзанурюваль-

ними гвинтами показали, що найчастіше несправності виникають у системі гідроуправління.

За результатами проведеного аналізу побудовано діаграму Ішикави несправностей основних функціональних вузлів пропульсивного комплексу з напівзанурювальними гвинтами. Розроблена діаграма надає можливість виявити ключові взаємозв'язки між різними факторами та більш достеменно зрозуміти досліджуваний процес.

Таблиця 2

Вигляд несправностей основних функціональних вузлів пропульсивного комплексу з НЗГ

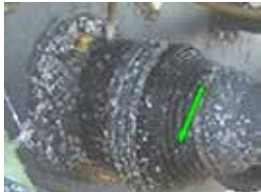
№	Несправність	Приклад вигляду	№	Несправність	Приклад вигляду
1	Тріщина на транці судна		6	Перегрів компенсатора ГД	
2	Руйнування торсіонного вала		7	Обрив еластичної муфти	
3	Обрив юпки поршня ГД		8	Розрив захисних чохла (під водою)	
4	Поломка шатунів ГД		9	Знос сферопідшипників	
5	Руйнування картера ГД		10	Розрив гнучких шлангів	



Рис. 5. Діаграма Ішикави несправностей основних функціональних вузлів ПК з НЗГ

Список літератури:

1. Blount D., Bartee R. Design of Propulsion Systems for High-Speed Craft. *Marine Technology*. 1997. Vol. 34. P. 276–292. DOI: 10.5957/mtl.1997.34.4.276.
2. Gatete E., Ndiritu H., Kiplimo R. Model-Based Performance Improvement of a High Speed-Boat Running on an Outboard Engine. *Journal of Sustainable Energy Engineering*. 2018. Vol. 4, No. 3. P. 111–124.
3. Gaggero S., Bonvino C., Ferrando M., Villa D., Gironi C., Mitri D. A new concept of a very high speed craft: design issues. 2015. URL: https://www.researchgate.net/publication/308300889_A_new_concept_of_a_very_high_speed_craft_design_issues (дата звернення: 04.10.2024).
4. Mashud K. Propeller Design. *Journal of the American Society for Naval Engineers*. 2002. Vol. 36, No 4. P. 693–695.
5. Boucetta D., Imine O. Numerical Simulation of the Flow around Marine Propeller Series. *Journal of Physical Science and Application*. 2016. Vol. 6, No 3. P. 55–61.
6. Manzke M., Rung T. Propeller-flow predictions using turbulent vorticity-confinement. *Computational Fluid Dynamics: 5th European Conference, Lisbon, Portugal, 14–17 June 2010. ECCOMAS CFD*. 2010. P. 19.
7. Allison J. L. Marine Waterjet Propulsion. *Chesapeake Section SNAME*. 1992.
8. Rose J. C., Kruppa C. F. L., Koushan K. Surface Piercing Propellers-Propeller/Hull Interaction. *Fast '93 : 2nd Intl Conf on Fast Sea Transportation, Yokohama, Japan, 13–16 December 1993. Yokohama : Soc Naval Architects of Japan*, 1993. Vol. 1. P. 867.
9. Ishikawa K. What is Total Quality Control? The Japanese Way. London : Prentice Hall, 1985. 215 p.
10. Mirjalili S., Lewis A., Mirjalili S. M. Multi-objective Optimisation of Marine Propellers. *Procedia Computer Science*. 2015. Vol. 51. P. 2247–2256. DOI: 10.1016/j.procs.2015.05.383.
11. Ekinici S. A Practical Approach for Design of Marine Propellers with Systematic Propeller Series. *Brodogradnja*. 2011. Vol. 62, No 2. P. 123–129.
12. Bal S. A Method for Optimum Cavitating Ship Propellers. *TUBITAK, Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*. 2011. Vol. 35, No 3. P. 139–158.

Voichenko T.O., Tryshyn V.V., Riashchenko O.I., Lisovskyi S.V. THE STUDY OF THE VESSELS PROPULSION COMPLEXES OPERATION PROBLEMS WITH SEMI-SUBMERSIBLE PROPELLERS

The aim of this paper is to study the problems of technical operation of propulsion systems of ships with semi-submersible propellers with further construction of the “root cause analysis” diagram (Ishikawa diagram). This goal is achieved by, firstly, analysing the main types of drives of small high-speed vessels in terms of their placement, construction, advantages and disadvantages; secondly, analysing the workload of vessels with semi-submersible propellers from the beginning of their operation; thirdly, analysing the percentage of typical failures and malfunctions of the main functional units of the propulsion complex of high-speed vessels with semi-submersible propellers. The analysis of the main types of drives for small high-speed vessels has made it possible to establish the peculiarities of the drive construction and its positive and negative aspects. It was found that at the water-air interface, where the resistance drops sharply, the Arneson drive with semi-submersible propellers is considered the most common. It provides a significant increase in speed and fuel consumption, reduces the vessel's draft, and solves the problem of cavitation. Therefore, vessels with semi-submersible propellers are most widely used for passenger transportation and special tasks related to patrolling, state border protection, searching for poachers, etc. The results of the analysis showed that their average operating time does not exceed 50% of the total operating time; the main modes of operation of the main engine using semi-submersible propellers account for about 80% of the total engine operating time; the duration of vessel loading in summer is almost 3 times higher than in winter; and the largest percentage of malfunctions of the main functional units of the propulsion complex are caused by malfunctions of the hydraulic control system. The most important result of the research is the constructed Ishikawa diagram of malfunctions of the main functional units of the propulsion complex with semi-submersible screws. Thus, the developed diagram makes it possible to identify the key relationships between various factors and to understand the process under study more accurately.

Key words: operation, vessel, propulsion system, partially submerged propellers, analysis, diagram.