

ISSN 2313-4763

Міністерство освіти і науки України

Херсонська державна морська академія

НАУКОВИЙ ВІСНИК
ХЕРСОНСЬКОЇ ДЕРЖАВНОЇ МОРСЬКОЇ АКАДЕМІЇ

Науковий журнал

Виходить двічі на рік

№ 1 (22)

Херсон
2020

Науковий вісник Херсонської державної морської академії : науковий журнал. Херсон : Херсонська державна морська академія, 2020. № 1 (22). 196 с.

Засновник і видавець – Херсонська державна морська академія

Рекомендовано до друку на засіданні вченої ради Херсонської державної морської академії (протокол № 1 від 28.08.2020 р.)

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

Букетов А. В., д.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, головний редактор.

Тематична спрямованість – Транспортні технології:

Гнатів А. В., д.т.н., Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна, відповідальний редактор рубрики;

Аргун Ш. В., к.т.н., Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна, член редколегії;

Ляшук О. Л., д.т.н., Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна, член редколегії;

Patlins Antons, Doctor of Engineering Science, Riga Technical University, Латвія, член редколегії;

Шарко В. О., д.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії.

Тематична спрямованість – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології:

Рожков С. О., д.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, відповідальний редактор рубрики;

Жук Д. О., к.т.н., Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, Україна, член редколегії;

Zhiravetska Anastasia, Dr. Sc. Ing., Professor, Riga Technical University, Латвія, член редколегії;

Полівода О. В., к.т.н., Херсонський національний технічний університет, Україна, член редколегії;

Степенко С. А., к.т.н., Національний університет «Чернігівська політехніка», Україна, член редколегії;

Хлопенко М. Я., д.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії.

Тематична спрямованість – Матеріалознавство:

Сапронов О. О., к.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, відповідальний редактор рубрики;

Акімов О. В., к.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії;

Брайло М. В., к.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії;

Dulebová Eudmila, PhD., assoc. Prof., Technical University of Kosice, Словаччина, член редколегії;

Сизоненко О. М., д.т.н., Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, Україна, член редколегії;

Стухляк П. Д., д.т.н., Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя, Україна, член редколегії;

Фесенко І. П., д.т.н., Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, Україна, член редколегії.

Адреса редакційної колегії: 73000, м. Херсон, просп. Ушакова, 20, тел.: (0552) 22-35-69

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації КВ № 18987-7776ПР від 11.05.2012 р.

Журнал унесено до Переліку наукових фахових видань України категорії «Б» (Наказ МОН України № 886 від 02.07.2020 р.).

Журнал індексується українською загальнодержавною реферативною базою даних «Україніка наукова», міжнародною наукометричною базою «Наукова електронна бібліотека E-Library.Ru» (Російський індекс наукового цитування – РИНЦ), міжнародною реферативною базою даних Google Scholar, міжнародною наукометричною базою Researchbib, представлений у Науковій електронній бібліотеці Національної бібліотеки України імені В.І. Вернадського, міжнародній реферативній базі даних Crossref.

ISSN 2313-4763

© Науковий вісник Херсонської державної морської академії, 2020

МОРСЬКИЙ ТА РІЧКОВИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 656.61

БЕЗПЕКА ДИНАМІЧНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ РУХОМОГО ОБ'ЄКТА ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ ПРИ НАКЛАДАННІ ПРИЧИН ВІДМОВ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ВІД РІЗНИХ НЕЗАЛЕЖНИХ ДЖЕРЕЛ

Габрук Р. А., к.т.н., керівник проєктів ТОВ «Оверсіз Лоджистік», e-mail: grostyslav@yahoo.com, ORCID: 0000-0002-5639-2475

У роботі розглянуто питання впливу на безпеку складної технічної системи рухомого об'єкта водного транспорту, суперпозиції незалежних причин відмов. Процес управління динамічним позиціонуванням рухомого об'єкта водного транспорту досліджено як взаємодію компонентів поліергатичної системи, а оператор системи динамічного позиціонування розглядається як її функціональний компонент, який формує суть людського чинника у безпеці мореплавства. Визначено, що саме властивість гетерогенності локально обмеженого простору техноприродного комплексу відіграє вирішальну роль, що впливає на безпеку на всьому просторово-часовому проміжку реалізації процесів високоточної навігації при виконанні технологічної роботи. Ймовірність, як міра у імовірнісному просторі Колмогорова, відображує показники функціональної стійкості в умовах раптових відмов, які виникають у результаті несприятливого поєднання випадкових зовнішніх факторів, що перевищують можливості до адаптації складної динамічної системи в їх оточенні. За сформульованими алгебраїчними виразами для двох типових незалежних причин відмов компонентів системи динамічного позиціонування складено алгоритм та проведено моделювання у програмному середовищі MATLAB з використанням пакету Simulink. Розроблене програмне забезпечення дозволяє при практичному застосуванні на борту або на березі під час стратегічного планування знаходити рішення цілого класу задач, які спрямовані на гарантування безпеки технічної складової поліергатичного управління. Визначено перспективні напрями подальших наукових досліджень.

Ключові слова: система динамічного позиціонування, безпека мореплавства, технічна система, рухомий об'єкт водного транспорту, відмова.

DOI: 10.33815/2313-4763.2020.1.22.004-010

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями. Системи динамічного позиціонування (СДП) з'явилися у середині минулого століття для гарантування реалізації процесу навігації рухомих об'єктів водного транспорту (РОВТ) при виконанні технологічної роботи буріння у акваторіях з великими глибинами. СДП швидко поширилися в усіх сферах світового морського флоту та стали невід'ємною його частиною.

Світова статистика аварійності РОВТ всіх типів свідчить про підвищення імовірності виникнення аварійних подій як від відомих джерел загроз, так і загроз від нових джерел, що сформувалися під впливом суперпозиції оточуючих гетерогенних факторів. Основна причина полягає у властивості гетерогенності акваторії техноприродного комплексу при реалізації динамічного позиціонування (ДП) РОВТ для цільового виконання конкретної технологічної роботи.

Україна є невід'ємною і важливою частиною світової морської спільноти, яка інтегрована у процес дослідження та пошуку нових методів підвищення ефективності та якості гарантовано безпечного ДП. Зокрема, повним ходом проводиться виконання науково-дослідної роботи «Розробка програмних засобів для підвищення якості функціонування систем динамічного позиціонування морських суден», номер державної реєстрації 0119U100948. Саме створення нових програмно-апаратних комплексів є перспективним напрямом, який забезпечить отримання практичного результату після впровадження науково обґрунтованих рішень на борту РОВТ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких започатковано розв'язання даної проблеми. Процес управління ДП РОВТ розглядається як взаємодія компонентів поліергатичної системи, а оператор СДП є її функціональним компонентом, який формує суть людського чинника у безпеці. У безпеці мореплавства при ДП під людським чинником слід розуміти сукупність можливості та здатності оператора СДП по прийому, обробці

інформації і ухваленню рішень у різних динамічних ситуаційних умовах. Проте гарантовано безпечне управління оператором неможливе без надійного функціонування всіх технічних систем.

А.С. Мальцевим розглядається проблема ДП за відхилень параметра управління, величина якого порівняна з похибками його визначення у [1], проблематика навігаційної безпеки та ергономічні аспекти безпеки при реалізації управління РОВТ розглядаються у [2].

Досліджуваний у даній роботі напрям полягає в оцінці надійності функціонування технічних компонентів СДП. Надійність функціонування полягає у відсутності відмов компонентів з технічних причин (водночас людський чинник не розглядається). Що викликає необхідність моделювання складних систем. Моделюванню складних динамічних систем присвячено [3].

Проте залишається невизначеним питання імовірності надійного функціонування технічної системи при накладанні незалежних причин відмов під час здійснення ДП РОВТ в гетерогенній акваторії техноприродного комплексу.

Постановка задачі. Метою є гарантування безпечного функціонування складних технічних систем рухомого об'єкта водного транспорту при накладанні причин відмов від різних незалежних джерел для реалізації безпечної навігації при динамічному позиціонуванні.

Викладення основного матеріалу дослідження. СДП складається з активних і статичних компонентів [4]. До активних компонентів відносять генератори, рушії, автоматично керовані клапани і так далі. До статичних компонентів відносять кабельні траси, дроти, трубопроводи і так далі. При забезпеченні належного захисту, схваленого Адміністрацією держави, і дотримання норм технічної експлуатації вважається, що статичні компоненти не можуть вийти з ладу. Одиначною відмовою вважається відмова одного з активних компонентів або одного зі статичних компонентів, якщо статичний компонент не задокументований належним чином відносно захисту і надійності.

Проводячи дослідження простору Колмогорова з міркувань надійності технічних систем, встановлено, що час безвідмовної роботи є випадковою величиною, яка підпорядковується відповідному розподілу, де елементарні події – це результати моделювання випадкового експерименту. Отже, поняття імовірності відмови залежить від щільності її розподілу, що надає можливість перейти до розглядання декількох незалежних причин відмов.

Для науково-практичного дослідження за об'єкт моделювання визначимо кілька незалежних причин відмов, які є найпоширенішою парою в СДП РОВТ. Перший фактор є суттю раптової відмови, а другий фактор описується основним законом розподілу – нормальним законом розподілу часу безвідмовної роботи.

Раптові відмови виникають у результаті несприятливого поєднання випадкових зовнішніх факторів, що перевищують можливості до адаптації в їх оточенні. З такими відмовами надзвичайно важко боротися, оскільки їх важко передбачити. Для боротьби з наслідками таких відмов відбувається відповідне резервування апаратури для СДП першого, другого і третього класів. Водночас характерною ознакою навігаційного обладнання, яке використовується для визначення вектора стану та координат РОВТ, є необхідність роботи каналу вимірювань за різними фізичними принципами.

Функція розподілу в теорії імовірності – це функція, яка характеризує розподіл випадкової величини відображає імовірність того, що випадкова величина τ прийме значення, яке менше або дорівнює T [5]. Функція розподілу часу безвідмовної роботи τ $F(T)$:

$$F(T) = \tilde{P}(\tau \leq T), \quad (1)$$

де T – детермінований досліджуваний час, год; \tilde{P} – імовірність або ймовірнісна міра у імовірнісному просторі Колмогорова; τ – час безвідмовної роботи, год.

При суперпозиції двох незалежних причин відмов:

$$F(T) = 1 - (1 - F_1(T))(1 - F_2(T)). \quad (2)$$

З урахуванням зазначеного вище, результувальний досліджуваний розподіл матиме наступний вигляд:

$$F(T) = 1 - (1 - (1 - e^{-\lambda T})) \left(1 - \Phi \left(\frac{T - c}{\sigma} \right) \right) = 1 - e^{-\lambda T} \left(1 - \Phi \left(\frac{T - c}{\sigma} \right) \right), \quad (3)$$

де λ – інтенсивність потоку відмов, 1/год; Φ – функція Лапласа; c – оцінка математичного очікування, год; σ – середнє квадратичне відхилення, год.

Відповідно щільність досліджуваного розподілу матиме вигляд:

$$f(T) = e^{-\lambda T} \left(\frac{e^{-\frac{(T-c)^2}{2\sigma^2}}}{\sigma\sqrt{2\pi}} + \lambda \left(1 - \Phi \left(\frac{T - c}{\sigma} \right) \right) \right), \quad (4)$$

Для моделювання оберемо середовище програмування MATLAB. MATLAB – одна з найстаріших, ретельно опрацьованих і перевічених часом систем автоматизації математичних розрахунків [6]. Принципи та функціональні можливості програми творці мови висловили в гаслі «думай векторно». Мова MATLAB є високорівневою інтерпретованою мовою програмування, яка містить засновані на матрицях структури даних, широкий спектр функцій, інтегроване середовище розробки, об'єктно орієнтовані можливості та інтерфейси до програм, які написано іншими мовами програмування.

До складу MATLAB входить бібліотека візуального програмування Simulink, що дозволяє побудувати логічну схему системи управління, використовуючи тільки стандартні блоки. Після конструювання схеми можна детально проаналізувати її роботу. Сигнали, значення параметрів і атрибути схеми вказуються або безпосередньо на самій схемі, або можуть бути введені з текстової консолі. Використання готових моделей дозволяє управляти набором даних і швидко перепрофілювати моделі. MATLAB працює з різними типами даних: цілими, речовими, з фіксованою комою, матрицями, векторами, та іншими типами даних.

MATLAB – інженерний пакет високого рівня, ретельно налагоджений, широко використовуваний у багатьох сферах наукових досліджень, інженерних розрахунках і моделюванні складних динамічних систем та систем автоматичного управління. Як недолік можна зазначити, що часто при використанні цієї програми доводиться працювати з великою кількістю вікон, з якими зручніше працювати на двох моніторах. Програма має хорошу довідкову систему – меню help. Обсяг фірмової документації досягає майже 5 тисяч сторінок, однак, це робить її важкодоступною для огляду, проте вона покриває майже всі питання, які можуть виникнути в процесі роботи. Середовище охоплює величезні можливості візуалізації даних. Воно має достатню кількість функцій для побудови графіків, зокрема й тривимірних, візуального аналізу даних. Середовище MATLAB є найширшим середовищем програмного забезпечення комп'ютерної математики, що

використовує досвід, методи та правила математичних обчислень, які було накопичено за тисячі років розвитку математики.

Саме тому для наукових досліджень та розробки програмних засобів використання середовища MATLAB з пакетом Simulink є найбільш перспективним.

За вищенаписаною формулою проведемо імітаційне моделювання для дослідження впливу значень лямбда на характер щільності розподілу. Алгоритм для розрахунку щільності досліджуваного розподілу в середовищі програмування MATLAB за допомогою пакету Simulink матиме вигляд, представлений на рис. 1.

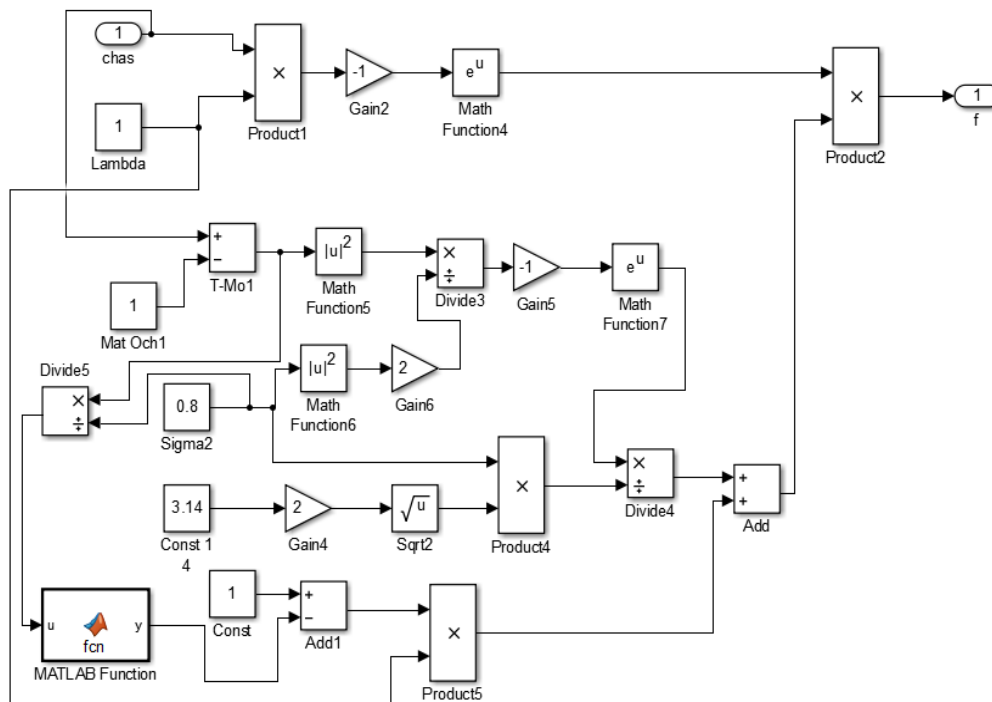


Рисунок 1 – Алгоритм розрахунку щільності впливу незалежних факторів відмов у середовищі програмування MATLAB з використанням пакету Simulink

При практичному розрахунку за пропонованими формулами необхідно вказати на використання блоку MATLAB Function для розрахунку функції Лапласа. За допомогою поточного визначення функції Лапласа ми отримуємо графік, який виражає щільність розподілу залежно від часу T (цей час ми позначаємо при моделюванні на детермінованих проміжках). На графіку ми позначаємо час загальним позначенням t (рис. 2).

З графіка (рис. 2) видно, що значення λ впливає на характер щільності розподілу, адже інші члени формули є константами, які задаються перед початком моделювання. І при збільшенні λ нагадує більш експоненціальну функцію, при зменшенні – нормальний розподіл.

Для практичних розрахунків ми маємо скористатися методом розбиття на досліджувані проміжки. За такої умови обираємо межу розбиття Θ_τ . Тоді можна записати наступне:

$$e^{-\lambda\Theta_\tau} \left(1 - \Phi \left(\frac{\Theta_\tau - c}{\sigma} \right) \right) = 1 - \nu(\Theta_\tau), \quad (5)$$

де $\nu(\Theta_\tau)$ – частота значень τ_i , що лежать ліворуч від межі Θ_τ , 1/год.

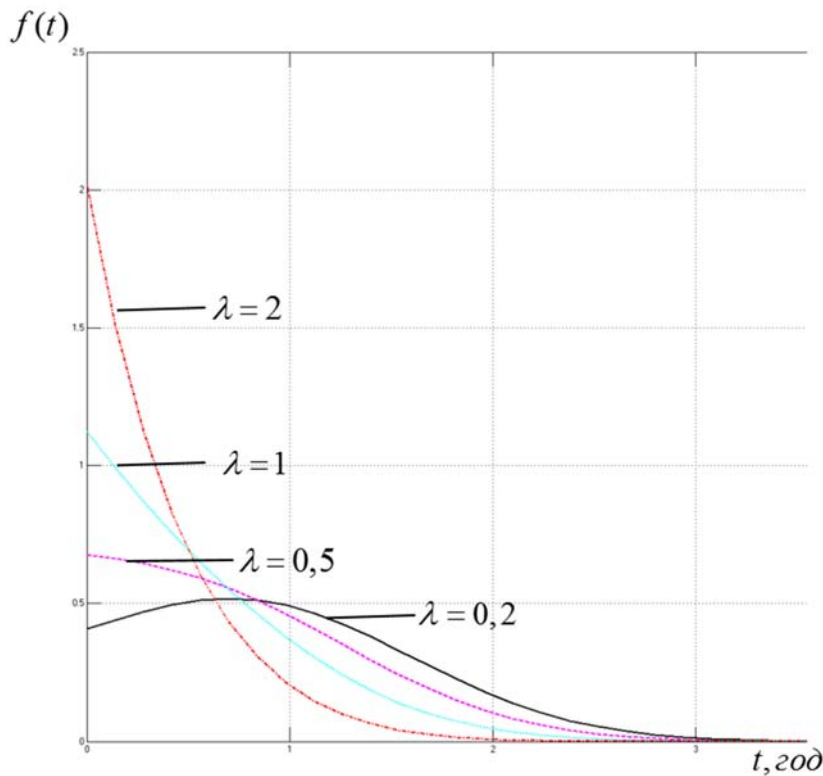


Рисунок 2 – Результати моделювання досліджуваної щільності одночасного впливу незалежних факторів відмов на складну технічну систему

$$\lambda = \frac{\ln\left(1 - \Phi\left(\frac{\theta_\tau - c}{\sigma}\right)\right) - \ln(1 - v(\theta_\tau))}{\theta_\tau} \quad (6)$$

Отже, ми можемо практично знайти значення λ , які необхідні для оцінки імовірності безпечного функціонування за наявності значень величин c та σ .

Час має бути узгодженою величиною з кроком моделювання, що залежить від середовища програмної реалізації алгебраїчних моделей та стратегії методології динамічного програмування.

При накладанні більшої кількості незалежних причин відмов може бути використана наступна алгебраїчна залежність:

$$F(T) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - F_i(T)), \quad (7)$$

де n – кількість незалежних причин відмов.

Кількісним показником рівня безпеки буде імовірність $\tilde{P}(\tau \geq T)$, що являє собою суть того, що за обраний час T система буде функціонувати надійно.

При обранні критерію імовірності безпечного функціонування РОВТ при здійсненні ДП в локально обмеженому просторі виконання технологічної роботи, необхідно брати до уваги, що РОВТ знаходиться, з одного боку, в потоці подій, які збурюють та загрожують безпеці і на них реагує група кваліфікованих ОСДП, а з іншого боку, РОВТ як складна технічна система має імовірність безпечного функціонування всіх складових. Імовірність функціонування технічних систем РОВТ різного рівня ієрархії описується відповідними законами розподілу.

Висновки і перспектива подальших наукових досліджень. Визначені аналітичні залежності, а також результати імітаційного моделювання, розроблене програмне забезпечення в середовищі програмування MATLAB з використанням пакету Simulink дозволяють при практичному застосуванні знайти вирішення цілого класу

задач, які спрямовані на гарантування безпеки технічної складової полієргатичного управління РОВТ при ДП.

Складна проблема комплексного питання безпеки на всьому часово-просторовому проміжку полієргатичного управління ДП РОВТ в локально обмеженому просторі техноприродного комплексу потребує подальших досліджень у наступних напрямках: створення нових інтелектуальних ПАК підтримки прийняття рішень (ППР); науково обґрунтованому удосконаленні міжнародних та вітчизняних вимог, стандартів і правил; удосконаленні роботи систем управління рухом РОВТ в гетерогенно збудованих акваторіях; моделювання роботи операторів СДП в потоці загрозливих подій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Мальцев А. С. Динамічне позиціонування судна при відхиленнях параметру управління, величина якого порівняна з похибками його визначення. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії : науковий журнал*. Херсон : Херсонська державна морська академія, 2020. № 1 (20). С. 44–54.
2. Мальцев А. С. Управління рухом судна. Одеса : Вість, 1995. 235 с.
3. Баранов Г. Л., Брайловський М. М., Засядько А. А. Р-моделювання складних динамічних систем. К. : ДУІКТ, 2008. 131 с.
4. ММО КБМ Циркуляр 645. Вказівки щодо суден з динамічними системами позиціонування. Лондон : ММО, 1994. 22 с.
5. Хінчин А. Я. Обрані праці з теорії імовірності. М. : Транспорт, 1995. 552 с.
6. Гультьєв А. Візуальне моделювання в середовищі MATLAB : навчальний курс - СПб. : Пітер, 2000. 432 с.

REFERENCES

1. Maltsev A. S. (2020). Dynamic positioning of the vessel at deviations of the control parameter, the value of which is compared with the errors of its determination. *Scientific Bulletin of the Kherson State Maritime Academy : scientific journal*. № 1 (20). Kherson : Kherson State Maritime Academy. P. 44–54.
2. Maltsev A. S. (1995). *Ship traffic control*. Odessa : Vist. 235 p.
3. Baranov, G. L., Brailovsky, M. M. & Zasyadko, A. A. (2008). *P-modeling of complex dynamic systems*. Kyiv : SUIKT. 131 p..
4. *IMO MSC Circular 645. Guidelines for vessels with dynamic positioning systems*. (1994). London : IMO. 22 p.
5. Hinchin A. Ya. (1995). *Selected works on probability theory*. Moskva : Transport. 552 p.
6. Gulyaev A. (2000). *Visual modeling in the MATLAB environment: training course*. Sankt Peterburg : Piter. 432 p.

Габрук Р. А. БЕЗОПАСНОСТЬ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА ПРИ НАЛОЖЕНИИ ПРИЧИН ОТКАЗА ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОТ РАЗНЫХ НЕЗАВИСИМЫХ ИСТОЧНИКОВ

В работе рассмотрены вопросы влияния на безопасность сложной технической системы подвижного объекта водного транспорта суперпозиции независимых причин отказов. Процесс управления динамическим позиционированием подвижного объекта водного транспорта исследован как взаимодействие компонентов полиэргатической системы, а оператор системы динамического позиционирования рассматривается как ее функциональный компонент, который формирует суть человеческого фактора в безопасности мореплавания. Определено, что именно свойство гетерогенности локально ограниченного пространства техноприродного комплекса играет решающую роль, которая влияет на безопасность на всем пространственно-временном промежутке реализации процессов высокоточной навигации при выполнении технологической работы. Вероятность, как мера в вероятностном пространстве Колмогорова, отображает показатели функциональной устойчивости в условиях внезапных отказов, возникающих в результате неблагоприятного сочетания случайных внешних факторов, превышающих

возможности к адаптации сложной динамической системы. По сформулированным алгебраическими выражениям для двух типичных независимых причин отказов компонентов системы динамического позиционирования составлен алгоритм и проведено моделирование в программной среде MATLAB с использованием пакета Simulink. Разработанное программное обеспечение позволяет при практическом применении на борту или на берегу во время стратегического планирования находить решение целого класса задач, направленных на обеспечение безопасности технической составляющей полиэргатического управления. Определены перспективные направления дальнейших научных исследований.

Ключевые слова: система динамического позиционирования, безопасность мореплавания, техническая система, подвижный объект водного транспорта, отказ.

Gabruk R. A. DYNAMIC POSITIONING SAFETY ON MOBILE WATER TRANSPORT OBJECTS DURING TECHNICAL SYSTEMS FAILURES SUPERPOSITION FROM INDEPENDENT SOURCES

In the paper it was considered the influence of independent failure causes superposition on the complex technical system safety of mobile water transport object. The process of dynamic positioning control of mobile water transport object is studied as the interaction of components of the polyergatic system. The dynamic positioning operator is considered as a functional component, which forms the sense of the human factor in safety of marine navigation. It is determined that the property of heterogeneity of the locally confined space of the techno-natural complex plays a major role, which influences safety during all space-time interval of high-precision navigation realization during conducting the complex technological work.

Probability, which in the paper is considered as a measure in well-known Kolmogorov's probability space, reflects the functional stability criteria under conditions sudden failures. Failures arise as a result of an unfavorable combination of random external factors that exceed possibilities of complex dynamic system adaptation. The value of the heterogeneous flow of perturbing events affects the distribution density nature, because other members represent constants factors in research time frame. The corresponding adequate laws of distribution describe the probability of the reliable function of complex technical systems with different hierarchy levels.

Based on the formulated algebraic expressions for common in marine practice two independent failure causes of the dynamic positioning system components, an algorithm was drawn up and simulated in the MATLAB software environment with additional usage of Simulink package. Developed software package allows during practical conditions on board and on shore find solutions to a whole problem class in order to ensure safe and reliable function of the technical component, which is a part of the polyergatic system that aimed to control dynamic positioning and technological work under flow of perturbing events. The perspective directions of further scientific researches have been determined. The main direction of further researches is a creation of new intelligent decision support systems, which are based on mathematical modelling and reliability prediction. One of proposed directions form scientific ground for improvement of international and local requirements, standards and rules for technical systems and equipment redundancy.

Keywords: dynamic positioning system, safety of navigation, technical system, mobile water transport object, failure.

© Габрук Р. А.

Статтю прийнято
до редакції 26.06. 20

ОЦІНКА РИЗИКІВ ТА РІВНЯ БЕЗПЕКИ ПРИ ЗІТКНЕННІ СУДНА З МОСТОМ

Голіков А. О., к.т.н., завідувач кафедри «Морські технології» Національного університету «Одеська морська академія», e-mail: agolikoff@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0648-0733;

Олійник Ю. А., аспірант Національного університету «Одеська морська академія», e-mail: j0633590714@gmail.com, ORCID 0000-0003-0426-1104

У статті розглядаються види, фактори, причини та наслідки аварій при зіткненні судна з мостом. Ця проблема є досить актуальною на сьогодні, оскільки не зважаючи на сучасний рівень розвитку морської галузі, подібні аварії відбуваються щорічно. Це викликає необхідність вживати заходи щодо підвищення безпеки навігації наявних зон. У роботі була представлена процедура оцінки рівня безпеки та етапи виявлення ризиків шляхом визначення ймовірності зіткнення з прольотами мосту, опорами й іншими конструкціями, визначення найбільш уразливих місць, а також можливі наслідки такого пошкодження (для судна, моста, навколишнього середовища). Розглянуті методи захисту моста та методи зниження ризику. Результатами дослідження є розробка рекомендацій для уникнення можливої небезпеки, пом'якшення наслідків та зменшення ризиків при зіткненні судна з мостом. У статті запропонована імплементація сучасних морських технологій, таких, як віртуальні засоби навігації та технології додаткової реальності, які значною мірою покращують моніторинг за навколишнім середовищем, отже, таке впровадження зменшує ризик виникнення аварійної ситуації. Забезпечення застосування повного спектра доступними методами необхідно для визначення ризику та захисту мостів від нещасних випадків.

Ключові слова: зіткнення суден з мостами, оцінка рівня безпеки, виявлення ризиків, уникнення небезпеки, розробка рекомендацій.

DOI: 10.33815/2313-4763.2020.1.22.011-021

Постановка задачі. Щорічно відбуваються серйозні зіткнення суден з мостами, трапляються катастрофи, які спричиняють до крах мостів, загибель суден і людські жертви. Статистика показує, що контакти та навали суден є головними причинами пошкоджень, 30% зіткнення суден з мостами закінчуються повним руйнуванням останніх. Ця проблема голосно заявила про себе, починаючи з 60-х років ХХ століття, коли у зв'язку з ростом інтенсивності судноплавства та розмірів суден зростав і масштаб завданих лих [1].

У зв'язку зі збільшеними темпами спорудження мостів, необхідно враховувати ризики пошкодження їх суднами.

Отже, удосконалення сучасних методів судноводіння в складних умовах навігації під мостом є невід'ємною задачею, що значною мірою зможе покращити безпеку мореплавства.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Міжнародна морська організація (ФОБ / FSA), яке дозволяє розглядати потенційні ризики до їх виникнення [2]. Навігаційна безпека безпосередньо пов'язана зі складністю умов плавання суден і залежить головне від якості управління на всіх ділянках маршруту.

Оцінювання ризиків при зіткненні є дуже важливою проблемою, для якої також були розроблені національні та міжнародні правила та керівництва, такі, як: AASHTO 1991 [3], E DIN 1055-92000 [4], ENV 1991-1 Eurocode 1 1994 [5], Larsen 1993 [6].

На сьогодні проблема ризиків зіткнення судна з мостом розглянута досить повно у наступних роботах [7-11], в яких описуються головні проблеми з цієї теми, а також вирішення загальних задач.

Важливим науковим напрямом є опис сучасних підходів до оцінки безпеки судноплавства під час руху під мостом, який заснований на застосуванні математичної моделі урахуваючи дії реальних гідрометеорологічних чинників [12].

У роботі [13] пропонуються три методи альтернативної методології для забезпечення гнучкості проектування моста при встановленні критеріїв зіткнення із судном

або баржею. Однак ці методи реалізуються тільки при будівництві планованих мостів, що не вирішує проблему в реальному часі.

Розробка баз даних при зіткненні суден з мостами описана в роботі [14], де міститься докладна інформація про більш ніж 200 аварій за останні чотири десятиліття, які вказують, що в 70 % випадків зіткнень причиною є людський фактор. Дане дослідження наочно продемонструвало напрям, в якому необхідно рухатися задля уникнення подібних аварійних ситуацій.

У роботах [15, 16] детально розглянуті методи захисту, а також статичні та динамічні випробування опор моста.

У даній статті розглядається загальна оцінка ризиків, а також підвищення безпеки мореплавства при повсюдному використанні новітніх морських технологій, таких, як віртуальні засоби навігації, що не було розглянуто в попередніх працях.

Мета дослідження – підвищення та надання відповідної оцінки рівня безпеки при зіткненні судна з мостом, а також розробка рекомендацій для зменшення наслідків аварії.

Викладення основного матеріалу дослідження. Для кількісної оцінки рівня безпеки при зіткненні судна з мостом зазвичай застосовується концепція ризику. Ризик може бути визначений як поєднання ймовірності та наслідків після даного виду аварій. Небезпека зіткнення виникає при виході судна з безпечних водних меж.

Безпека моста може визначатися як його здатність протистояти експлуатаційним навантаженням при зіткненні із судном. Проблема полягає в тому, що багато мостів, в особливо історичних, не призначені для виконання цього критерію. Отже, згідно зі статистикою, за останні 50 років було знищено 29 мостів. Не зважаючи на те, що ризик зіткнення з мостом здається малоімовірним, наслідки такої події можуть бути катастрофічними. Найбільш серйозні аварії, пов'язані із зіткненням судно–міст відображені в статистичних даних, представлених на рис. 1 та в табл. 1.

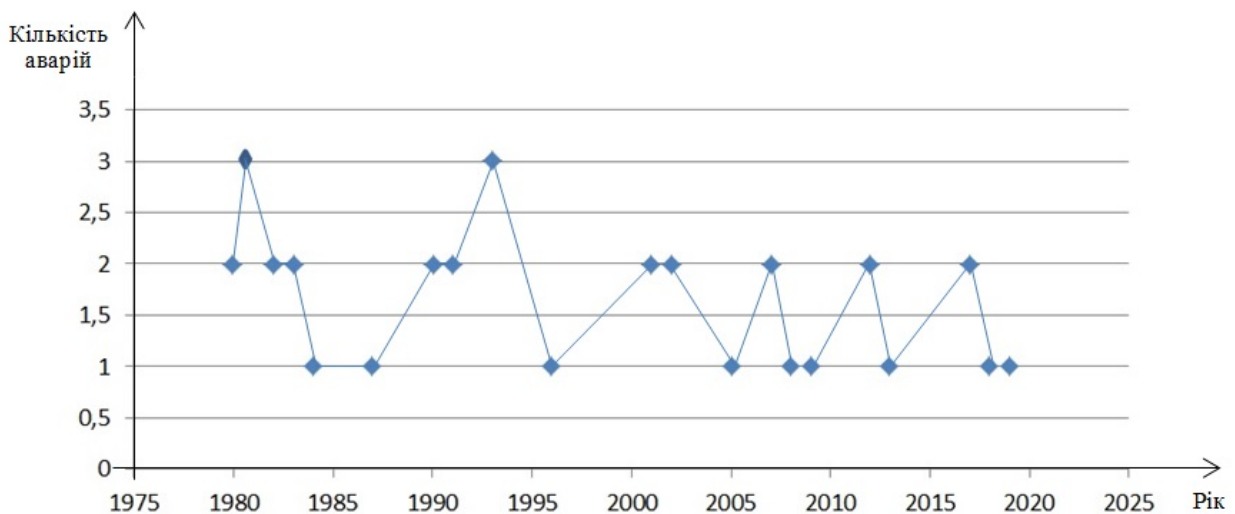


Рисунок 1 – Статистичний графік зіткнень суден і мостів упродовж 1975–2020 років

Таблиця 1 – Кількість загиблих у результаті зіткнення судно–міст (1960–2020)

<i>Назва моста / країна</i>	<i>Рік аварії</i>	<i>Кількість загиблих</i>
1	2	3
Severn River Railway/Великобританія	1960	5
5 Lake Ponchartrain, США	1964	6
Sidney Lanier, США	1972	10
Lake Ponchartrain, США	1974	3
Tasman, Австралія	1975	15
Pass Manchac, США	1976	1

Продовження табл. 1

1	2	3
Tjorn, Швеція	1980	8
Sunshine Skyway, США	1980	35
Lorraine Pipeline, Франція	1982	7
Sentosa Aerial Tramway, China	1983	7
Ульянівський залізничний, РФ	1983	176
Claiborn Avenue, США	1993	1
CSX/Amtrak Railroad, США	1993	47
Port Isabel, США	2001	8
Webber-Falls, США	2002	12
West Bridge, Данія	2005	1
Троїцький, РФ	2005	-
Bridge 19 in Welland Canal	2015	-
Технологічний, РФ	2016	-
Ломоносова, РФ	2017	-
Oshima Bridge	2018	-
Gwangan Bridge, South Korea	2019	-

Наслідки сучасних аварій:

– Західний міст у Великому поясі (m/v «Karen Danielsen») – зіткнення відбулося у 2005 році, під час аварії із судна збило два крани та зруйнувало верхню палубу, на борту спалахнула пожежа, старший офіцер був біля штурвала і загинув під час аварії, кілька інших членів екіпажу отримали важкі поранення, зокрема й капітан, міст не отримав структурних пошкоджень і зміг знову відкритися через кілька годин [17];

– міст № 19 Канал Велленда в районі Порт-Колборн (m/v «Lena J») – зіткнення відбулося у 2015 році, судно та міст зазнали сильного збитку, рух каналу було закрито на деякий час, що призвело до великих фінансових витратах [18];

– міст Ошима, який з'єднує місто Янай (m/v «Erna Oldendorff») – зіткнення відбулося у 2018 році, міст не поніс значної шкоди та залишився відкритим для руху транспорту, однак водопровідна труба під мостом була розірвана, залишивши тисячі людей без водопостачання на декілька днів, судно отримало помітні ушкодження [19];

– міст Гванган у Південній Кореї (m/v «Seagrang») – зіткнення відбулося у 2019 році, у моста після зіткнення утворилася п'ятиметрова діра, судно отримало помітні ушкодження надбудов [20].

Тому при плаванні оцінка ризику зіткнення судна з мостом є дуже важливою складовою, яка визначається наступними факторами:

– імовірність зіткнення з прольотами мосту, опорами та іншими мостовими конструкціями;

– найбільш відкриті місця зіткнення з мостом;

– можливі наслідки від збитків для судна / моста / навколишнього середовища;

– методи захисту моста (рейдова бочка, штучні острови тощо);

– інші методи зниження ризику (системи зв'язності, правила руху, маркування тощо).

Оцінка ризику складається з трьох етапів наступної процедури (рис. 2):

1) ідентифікація небезпеки;

2) оцінка ймовірності;

3) аналіз наслідків.

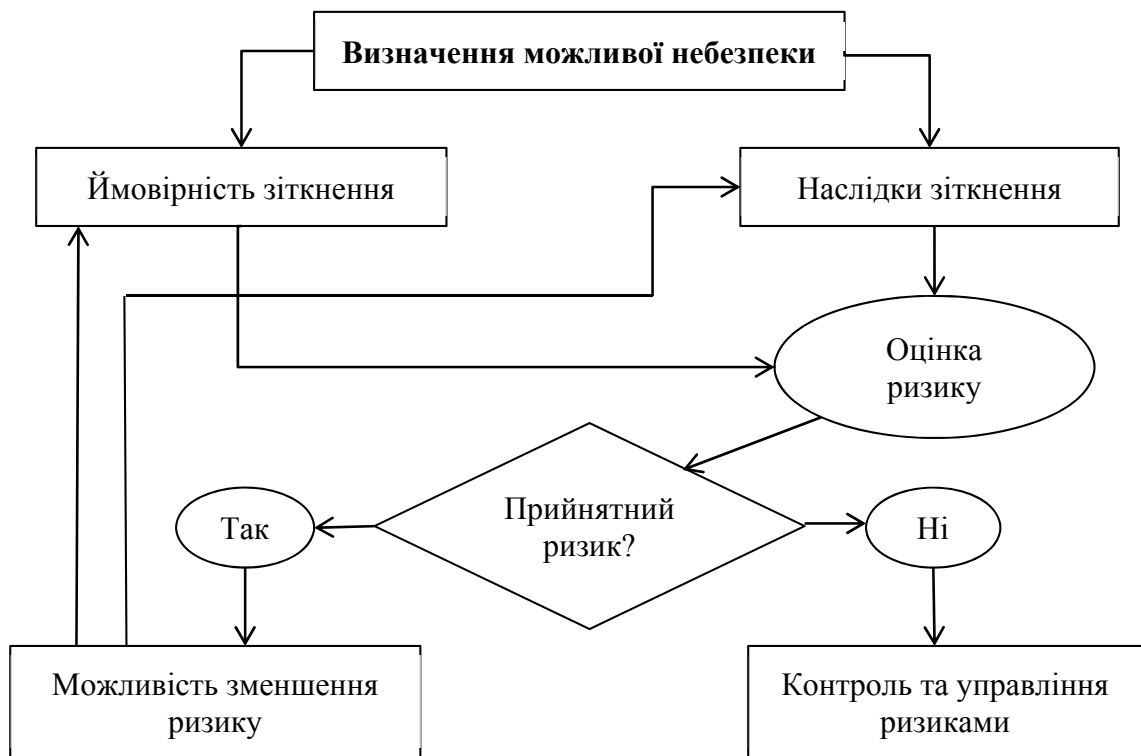


Рисунок 2 – Процедура оцінки ризику зіткнення судна з мостом

Існує кілька методів оцінки ризиків при зіткненнях суден з мостами. Найбільш важливими науковими методами, використовуваними для оцінки безпеки є:

1. Статистичні методи, засновані на базах даних про аварії;
2. Аналітичні методи;
3. Комп'ютерне моделювання експериментів:
 - моделювання в реальному часі та в режимі реального часу;
 - повні та спрощені комп'ютерні симулятори;
4. Реальні експерименти:
 - GPS-методи;
 - заміри за допомогою лазерів та тахеометрів;
 - фотограметричні дослідження.

Ризик R визначається як ймовірність утрат у певний час і висловлюється як множення ймовірності аварії та втрат в результаті інциденту. Якщо існує багато факторів ризику, загальний ризик виражається в такий спосіб:

$$R = \sum_{i=1}^n P_i C_i, \quad (1)$$

де P_i – ймовірність i -го нещасного випадку в даний момент часу ($i = 1, 2, \dots, n$); C_i – наслідки i -ї аварії в даний момент часу; n – кількість можливих аварій.

Для порівняння різних систем і використання припустимих критеріїв ризику слід увести міри ризику. Ці заходи можна розділити на індивідуальні та групові (соціальні). Індивідуально прийнятний ризик – це прийятна ймовірність того, що окрема особа, залучена до дії за ризиком, буде результатом нещасного випадку з фатальними наслідками.

Це можна виразити як:

$$R_{ai} = P_a P_{a/s} \leq \beta_i 10^{-4}, \quad (2)$$

де P_a – ймовірність аварії на рік; $P_{a/s}$ – ймовірність смерті у випадку аварії; β_i – коефіцієнт індивідуального ризику.

Соціально прийнятний ризик R_{ag} – це допустима ймовірність того, що внаслідок даної аварії буде мати лише присутні певна кількість смертей, що можна виразити як:

$$Rag = 1 - FN(n) = P(N > n) \leq \frac{Ci}{n}, \quad (3)$$

де $1-FN(n)$ – імовірність нещасного випадку з не менш ніж n загиблих; Ci – прийнятна ймовірність для $n = 1$.

Оцінку наслідків аварії при зіткненні судна з мостом можна розділити на три види (рис. 3):

- носове зіткнення з опорою моста;
- бокове зіткнення з опорою моста;
- зіткнення рубки (надбудови) з прольотом моста.

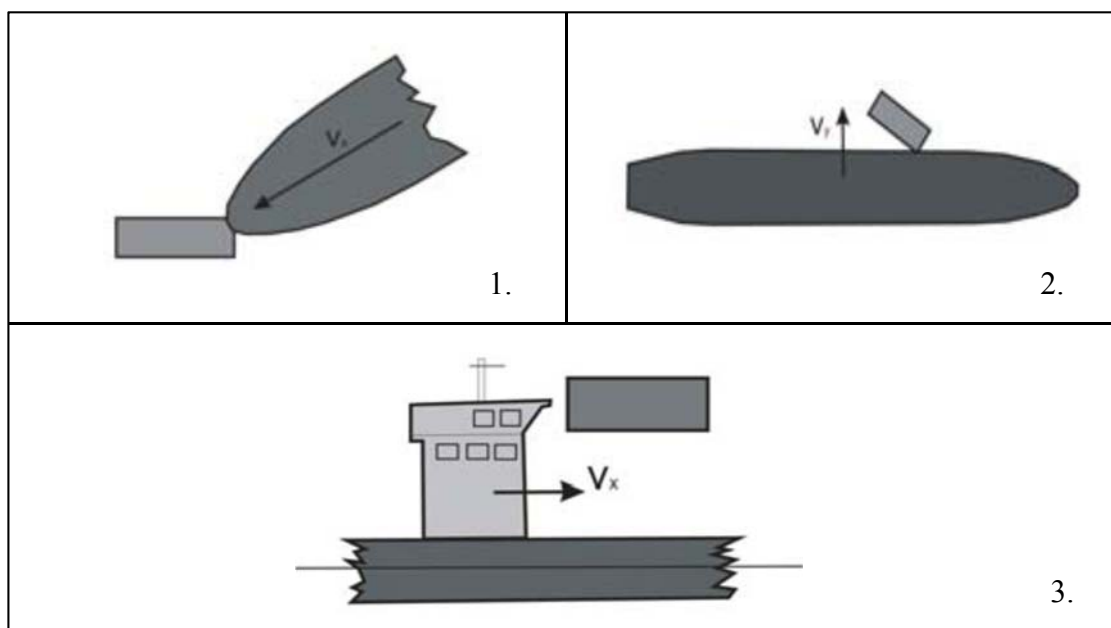


Рисунок 3 – Три види аварій при зіткненні судна з мостом

Найбільш поширеним є зіткнення з носом, за яких витрачається велика кількість енергії, яка несе руйнівні наслідки як для судна, так і для моста. Наслідки зіткнення судна з мостом залежать від наступних факторів:

- енергії судна, яка залежить від його маси, швидкості та виду удару;
- поглинання енергії судна при його структурному руйнуванні під час зіткнення;
- енергії поглинання елементів мосту.

Розглянемо декілька способів захисту мостів при зіткненні. Методи, які використовуються для малих і середніх суден довжиною менше ніж 100 метрів на малих швидкостях під час проходу, наступні:

- спрямовувальні кранці;
- кранці;
- швартові бочки.

Мостові огорожі для великих суден довжиною понад 100 м можна поділити наступним чином:

- швартові бочки;
- штучні острови;
- сталеві якірні дроти;
- плавучі понтони.

Використання будь-якого способу також залежить від глибини розташування стовпів моста та інших факторів.

На основі з вищезгаданого розроблено рекомендації для підвищення безпеки судноплавства під мостовими спорудами. Проводка судна під мостом обов'язково повинна

забезпечувати їх безаварійний рух через призначені судноплавні прольоти з необхідними інтервалами до опор та встановленим запасом по висоті. Рекомендований процес проводки повинен містити наступні елементи:

- визначення розташування судноплавного прольоту для даного напрямку руху;
- оцінки гідрометеорологічної обстановки в районі моста на момент підходу;
- вибір безпечного курсу;
- проходження під мостом і вихід на свій курс.

Слід ураховувати, що більшість морських аварій спричинені помилками екіпажу та неадекватними процедурами. Задля зменшення кількості аварій екіпаж повинен бути добре підготовлений.

Мости, розташовані уздовж навігаційного шляху, повинні мати певний загальний мінімальний запас висоти прольоту для всього водного шляху. Однак деякі мости іноді мають даний параметр нижче середнього. Залежно від рівня води такі мости можуть стати небезпечними через неусвідомлення судноводіїв недостатньої висоти прольоту, порівнюючи зі стандартним мінімальним значенням.

Для підвищення безпеки судноплавства на мостах повинні транслюватися віртуальні повідомлення ЗНО, що виділятимуть зону навколо та забезпечуватимуть фактичне значення запасу висоти прольоту (вертикальний зазор) у разі високого рівня води на конкретному об'єкті.

Віртуальні АІС ЗНО використовуються для маркування небезпек і перешкод. Наявний на судні бортовий ретранслятор AIS, ECDIS, ECS (Electronic Chart System) або AIS, сумісна з радіолокаційною системою, здатні попередити екіпаж про небезпеку зіткнення завчасно [21]. Також це допоможе при підході до багатопрогонного моста, щоб завчасно визначити розташування судноплавного прольоту для даного напрямку руху та порівняти габаритну висоту за позначками на опорах й інформаційними знаками з висотою свого судна. При перевищенні привести висотний габарит судна у відповідність шляхом прийняття баласту, завалювання шогл тощо. У ситуаціях, де реальні навігаційні знаки відсутні з будь-яких причин, необхідності в припиненні руху задля оцінки безпеки не буде за наявності віртуальних ЗНО.

Висновки. Розташовані на морських і внутрішніх судноплавних шляхах мостові переходи є уразливими об'єктами інфраструктури та мають такі особливості:

- обмежують навігаційні фарватери як у вертикальній, так і в горизонтальній площині, а навігаційні умови часто ускладнюються непередбачуваними течіями та вирами;
- в разі зіткнень із суднами та руйнувань мостів створюється загроза людям і транспортним засобам, які знаходяться на або біля споруди;
- вартість моста, зазвичай, значно більше вартості самого судна.

При підході судна до моста необхідно виконати ретельну підготовку, а також усі вимоги з безпеки, заздалегідь повинні бути відомі габарити ходового прольоту моста та габарити судна з урахуванням наявних рівнів та інформації з навігаційних карт. Для впевненості у відповідності параметрів слід зв'язатися з диспетчером руху для отримання необхідної інформації. Прохід під мостом дозволяється тільки через призначені для цієї мети судноплавні прольоти, обладнані діючими навігаційними знаками та вогнями. Особливі умови проходу під мостами зумовлені їх конструкцією, розташуванням і гідрологічними особливостями шляху, всі ці фактори також необхідно враховувати.

Для мінімізації ризиків і наслідків позаштатної ситуації пропонується сформувати «інтелектуальну» акваторію в районі судноплавної зони моста. За базову концепцію рекомендується використовувати закордонний і вітчизняний досвід реалізації стратегії е-навігації в прибережній зоні та районах дії СУРС [22].

Можна зазначити наступні основні причини аварійності при навігації у судноплавній зоні мостів:

- недостатня підготовка судноводіїв до роботи в особливих ситуаціях;
- технічна зношеність суден;

- оснащення суден застарілими навігаційними приладами й системами;
- недостатня оснащеність фарватерів навігаційними знаками та навігаційним обладнанням;
- зміна гідрометеорологічних і гідрологічних факторів.

Для підвищення рівня безпеки в судноплавній зоні моста пропонується використовувати не тільки пасивні конструктивні елементи захисту (штучні острівці, відбійники, пали), але й розглянути можливість використання активних елементів контролю у вигляді електронної системи визначення та попередження зіткнення судно-міст з використанням технології доповненої реальності [23]. Дана технологія дозволяє візуалізувати інформацію технічних засобів судноводіння в робочій зоні переходу, не відволікаючись від контролю реальної навігаційної обстановки.

Стосовно візуальних ЗНО, на яких у сучасному часі базується лоцманське забезпечення у вузькостях, на підходах і в акваторіях, у даному варіанті повинно бути не тільки на воді та суші, так само й на конструкціях мостів. Тому важливо мати можливість контролю місця розташування судна щодо осі фарватеру не тільки в режимі реального часу, а й у достовірному вигляді завдяки поєднанню реальної та доповненої картин району плавання. Використання сучасних радіонавігаційних систем та ЕКНІС відкриває широкі можливості для впровадження нових підходів до встановлення безпеки мореплавства з використанням віртуальних ЗНО.

В якості альтернативи використання АІС у таких місцях, де існує висока концентрація засобів навігації, пропонується використовувати модулі моніторингу по радіоканалу UHF (MF UHF або MTU 300). Ці модулі, в які вбудований 12-канальний приймач GPS, забезпечують положення буя або маяка в режимі реального часу.

Для використання представленого методу необхідно провести розрахунок ефективності покриття базовими станціями АІС на необхідній місцевості з метою здійснення спостереження за навігаційною обстановкою, контролю та передачею судноводіям каналами АІС оперативної навігаційної інформації про стан ЗНО (зокрема й віртуальних ЗНО), їх місце розташування та режими роботи.

Такий підхід дозволить не тільки оцінити ризики безпеки навігації в судноплавній зоні моста, але і ввести додаткові активні елементи контролю при плаванні в небезпечних зонах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Столкновения с мостами. *Электронный морской журнал*. URL : <http://www.morvesti.ru/themes/1693/71176/>
2. Formal Safety Assessment (IMO). *Official website of International Maritime Organization*. URL : <http://www.imo.org/en/OurWork/Safety/SafetyTopics/Pages/FormalSafetyAssessment.aspx>
3. *1991 Aashto Annual Meeting Proceedings: Selected Committee Meeting Papers Presented at the Seventy-Seventh Annual Meeting of the American Association – May 1, 1992*. URL : <https://policy.transportation.org/aashto-annual-meeting/>
4. Auslegungen zu DIN 1055-9 «Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 9: Außergewöhnliche Einwirkungen». Stand der Auslegungen: Oktober 2007. URL : <https://www.din.de/resource/blob/77472/af0b5a373f53d9d56c29e54672738a63/auslegungen-zu-din-1055-9-data.pdf>
5. *EN 1991-1-1 (2002) (English): Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-1: General actions - Densities, self-weight, imposed loads for buildings*. Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC. URL : <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1991.1.1.2002.pdf>

6. Ship Collision Analysis. Edited by Henrik Gluver and Dan Olsen (Larsen 1993). URL: <https://books.google.com.ua/books?id=FxwuDwAAQBAJ&pg=PT176&dq=Larsen+1993+Collision&hl=ru&sa=X&ved=0ahUKEwiS3X9yffpAhWaAxAIHRNvBJEQ6AEIMDAB#v=onepage&q=Larsen%201993%20Collision&f=false>
7. Мотрич В. Н. Столкновения судов и их предупреждение. Новый взгляд. Издательство: BHV, 2017. 349 с.
8. Проводка судов в местах расположения мостов. *Электронный морской журнал*. URL: <http://studepedia.org/index.php?vol=1&post=78450>
9. Guide Specifications and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges Second Edition 2009. URL : https://books.google.com.ua/books?id=V3jQalaH47UC&printsec=frontcover&hl=ru&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
10. Larsen O.D. Ship Collision with Bridges: The Interaction between Vessel Traffic and Bridge Structures. IABSE, 1993. 131 p.
11. Risk assessment of bridge collision – using Monte Carlo Simulation. URL : <https://www.sspa.se/safety-security-and-risk/risk-assessment-bridge-collision-using-monte-carlo-simulation>
12. Зайков В. И., Колосов М. А. Повышение безопасности при движении судов под мостами. URL : <http://rostransport.com/transportrf/archiv/text.php?ID=&pdf=10531>
13. Knott M., Winters M. Ship and barge collision with bridge over navigable waterway. *Electronic Marine Journal*. URL : <https://pdfs.semanticscholar.org/1783/5fb7e9b809f641e4769fe8292a53f7903d6a.pdf>
14. DAI Tong-yu, NIE Wu, LIU Ying - jie , WANG Li-ping, Statistical Analysis of Ship Collisions with Bridges in China Waterway. *Journal of Marine Science and Application*, Vol. 1, No. 2, December 2002. P. 28.
15. Holger Svensson, Protection of bridge piers against ship collision. *Steel Construction 2 (2009)*. Articles DOI: 10.1002/stco.200910004. P. 21–32.
16. ДБН В.2.3-XX:201X. Державні будівельні норми України, мости та труби, обстеження та випробування. Міністерство регіонального розвитку будівництва та житлово-комунального господарства України 201X. 20 с. (Інформація та документація).
17. Danielsen K. Collision with the Great Belt West Bridge 3 March 2005. The joint Bahamas Maritime Authorities & Danish Division for Investigation of Maritime Accidents report. URL : <https://www.bahamasmaritime.com/wp-content/uploads/2015/08/KAREN-DANIELSON-FINAL-REPORT-Mar-2005.pdf>
18. Voytenko M. Lena J collided with bridge in Colborne, Canada. *Electronic Marine News Journal FleetMon*. URL : <https://www.fleetmon.com/maritime-news/2015/9583/lena-j-collided-bridge-colborne-canada/>
19. Voytenko M. OLDENDORFF cargo ship collided with bridge, thousands cut off water, Japan. *Electronic Maritime Bulletin*. URL : <http://www.maritimebulletin.net/2018/10/22/oldendorff-cargo-ship-collided-with-bridge-thousands-cut-off-water-japan/>
20. Cheromcha K. Cargo Ship Led by Drunk Russian Captain Crashes into Major South Korea Bridge. *Electronic Marine News Journal The Drive*. URL : <https://www.thedrive.com/news/26693/cargo-ship-led-by-drunk-russian-captain-crashes-into-major-south-korea-bridge>
21. Голюков А. О., Олійник Ю. О. Актуальність використання віртуальних ЗНО на внутрішніх водних шляхах України. *Сучасні інформаційні та інноваційні технології на*

транспорті MINTT-2020 : зб. тез доп. Міжнар. наук.-практ. конф., м. Херсон, 27–29 травня 2020 р. Херсон, 2020.

22. E-navigation Portal (IALA). *Official website of The International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities*. URL : <https://www.iala-aism.org/technical/e-navigation/>

23. Бошков И. И., Крутикова А. А. Системы дополнительной реальности для морской навигации. *Технические науки*. 2018. № 8. – С. 6–8. URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/sistemy-dopolnennoy-realnosti-dlya-morskoy-navigatsii/viewer>

REFERENCES

1. Stolknoveniya s mostami. *Elektronny`j morskoy zhurnal*. URL: <http://www.morvesti.ru/themes/1693/71176/>

2. Formal Safety Assessment (IMO). *Official website of International Maritime Organization*. URL: <http://www.imo.org/en/OurWork/Safety/SafetyTopics/Pages/FormalSafetyAssessment.aspx>

3. 1991 Aashto Annual Meeting Proceedings: Selected Committee Meeting Papers Presented at the Seventy-Seventh Annual Meeting of the American Association – May 1, 1992. URL: <https://policy.transportation.org/aashto-annual-meeting/>

4. Auslegungen zu DIN 1055-9 «Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 9: Außergewöhnliche Einwirkungen». Stand der Auslegungen: Oktober 2007. URL: <https://www.din.de/resource/blob/77472/af0b5a373f53d9d56c29e54672738a63/auslegungen-zu-din-1055-9-data.pdf>

5. EN 1991-1-1 (2002) (English): Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-1: General actions - Densities, self-weight, imposed loads for buildings. Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC. URL: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1991.1.1.2002.pdf>

6. Ship Collision Analysis. Edited by Henrik Gluver and Dan Olsen (Larsen 1993). URL: <https://books.google.com.ua/books?id=FxwuDwAAQBAJ&pg=PT176&dq=Larsen+1993+Collision&hl=ru&sa=X&ved=0ahUKEwiS3X9yffpAhWaAxAIHRNvBJEQ6AEIMDAB#v=onepage&q=Larsen%201993%20Collision&f=false>

7. Motrich V. N. (2017). Stolknoveniya sudov i ix preduprezhdenie. *Novy`j vzglyad*. Izdatel`stvo: BHV. 349 s.

8. Provodka sudov v mestax raspolozheniya mostov. *Elektronny`j morskoy zhurnal*. URL: <http://studopedia.org/index.php?vol=1&post=78450>

9. Guide Specifications and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges Second Edition 2009. URL: https://books.google.com.ua/books?id=V3jQalaH47UC&printsec=frontcover&hl=ru&source=gb_s_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

10. Larsen O.D. Ship Collision with Bridges: The Interaction between Vessel Traffic and Bridge Structures. IABSE, 1993. 131 p.

11. Risk assessment of bridge collision – using Monte Carlo Simulation. URL: <https://www.sspa.se/safety-security-and-risk/risk-assessment-bridge-collision-using-monte-carlo-simulation>

12. Zajkov V. I., Kolosov M. A. Povy`shenie bezopasnosti pri dvizhenii sudov pod mostami. URL: <http://rostransport.com/transportrf/archiv/text.php?ID=&pdf=10531>

13. Knott M., Winters M. Ship and barge collision with bridge over navigable waterway. *Electronic Marine Journal*. URL : <https://pdfs.semanticscholar.org/1783/5fb7e9b809f641e4769fe8292a53f7903d6a.pdf>
14. DAI Tong-yu, NIE Wu, LIU Ying - jie , WANG Li-ping (2002). Statistical Analysis of Ship Collisions with Bridges in China Waterway. *Journal of Marine Science and Application*, Vol. 1, No. 2. P. 28.
15. Holger Svensson. (2009). Protection of bridge piers against ship collision. *Steel Construction 2*. Articles DOI: 10.1002/stco.200910004. P. 21–32.
16. DBN V.2.3-XX:201X. Derzhavni budivel`ni normy` Ukrayiny`, mosty` ta truby`, obstezhennya ta vy`probuvannya. Ministerstvo regional`nogo rozvy`tku budivny`cztva ta zhy`tlovo-komunal`nogo gospodarstva Ukrayiny` 201X. 20 s. (Informaciya ta dokumentaciya).
17. Danielsen K. Collision with the Great Belt West Bridge 3 March 2005. The joint Bahamas Maritime Authorities & Danish Division for Investigation of Maritime Accidents report. URL: <https://www.bahamasmaritime.com/wp-content/uploads/2015/08/KAREN-DANIELSON-FINAL-REPORT-Mar-2005.pdf>
18. Voytenko M. Lena J collided with bridge in Colborne, Canada. *Electronic Marine News Journal FleetMon*. URL : <https://www.fleetmon.com/maritime-news/2015/9583/lena-j-collided-bridge-colborne-canada/>
19. Voytenko M. OLDENDORFF cargo ship collided with bridge, thousands cut off water, Japan. *Electronic Maritime Bulletin*. URL : <http://www.maritimebulletin.net/2018/10/22/oldendorff-cargo-ship-collided-with-bridge-thousands-cut-off-water-japan/>
20. Cheromcha K. Cargo Ship Led by Drunk Russian Captain Crashes into Major South Korea Bridge. *Electronic Marine News Journal The Drive*. URL : <https://www.thedrive.com/news/26693/cargo-ship-led-by-drunk-russian-captain-crashes-into-major-south-korea-bridge>
21. Golikov A.O., Olijny`k Yu.O. (2020). Aktual`nist` vy`kory`stannya virtual`ny`x ZNO na vnutrishnix vodny`x shlyaxax Ukrayiny`. *Suchasni informacijni ta inovacijni texnologiyi na transporti MINTT-2020*: zb. tez dop. mizhnar. nauk.-prakt. konf., m. Xerson, 27-29 trav. 2020r. Xerson.
22. E-navigation Portal (IALA). *Official website of The International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities*. URL: <https://www.iala-aism.org/technical/e-navigation/>
23. Boshkov I. I., Krutikova A. A. (2018). Sistemy` dopolnitel`noj real`nosti dlya morskoy navigacii. *Texnicheskie nauki*. № 8. S. 6–8. URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/sistemy-dopolnennyj-realnosti-dlya-morskoy-navigatsii/viewer>

Голіков А. А., Олейник Ю. А. ОЦЕНКА РИСКОВ И УРОВНЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ СУДНА С МОСТОМ

В статье рассматриваются виды, факторы, причины и последствия аварий при столкновении судна с мостом. Эта проблема является достаточно актуальной на сегодняшний день, так как, несмотря на современный уровень развития морской отрасли, подобные аварии происходят ежегодно. Это вызывает необходимость принимать меры по повышению безопасности навигации имеющихся зон. В работе была представлена процедура оценки уровня безопасности и этапы выявления рисков, путем определения вероятности столкновения с пролетами моста, опорами и другими конструкциями, определение наиболее уязвимых мест, а также возможные последствия такого повреждения (судна, городов, окружающей среды). Рассмотрены методы защиты моста и методы снижения риска. Результатами исследования является разработка рекомендаций для избежания возможной опасности, смягчение последствий и уменьшение рисков при столкновении судна с

мостом. В статті пропонується імплементація сучасних морських технологій, таких, як віртуальні засоби навігації та технології додаткової реальності, які в значительній ступені покращують моніторинг за навколишнім середовищем, відповідно, таке впровадження зменшує ризик виникнення аварійної ситуації. Забезпечення застосування повного спектра доступних методів необхідно для визначення ризику та захисту мостів від нещасливих випадків.

Ключові слова: зіткнення судів з мостами, оцінка рівня безпеки, виявлення ризиків, уникнення небезпек, розробка рекомендацій.

Golikov A. A., Oleynik J. A. RISK AND SAFETY LEVEL ASSESSMENT OF SHIP – BRIDGE COLLISION

Bridges which located on maritime and inland waterways are defenseless object of infrastructure. One of their main features is the restriction of navigation channels, both vertically and horizontally, while navigation conditions are often complicated by unpredictable currents and whirlpools. A great threat to people and vehicles located on or near the structure occurred in case of collision with ships and the destruction of bridges. Also, the consequences of such incident are large financial costs, where the cost of the bridge is usually much more than the cost of the vessel itself. The article addresses the issue of types, factors, causes and consequences of ship-bridge collision accidents. In spite of the modern level of development in the maritime industry such accidents occur annually, thus this problem is relevant nowadays. It is necessary to take measures to increase the safety of navigation in appropriate zones. The article presents the procedure for assessing the level of safety and the stages of identifying risks by determining the probability of a collision with bridge spans, supports and other structures, also identifying the most defenseless places, as well as the possible consequences of such damage (ship, cities, environment). In addition, the paper considered the methods of protection the bridge from collision and methods for reducing navigational risk. The results of the research are developing recommendations for avoiding possible dangers, mitigation of consequences and reducing risks of vessel-bridge collision. It is proposed to form an «intellectual» zone in the navigable water area under bridge to minimize the risks and consequences of an emergency. As a basic concept, it is recommended to use foreign and domestic experience in implementing the e-navigation strategy in the coastal zone and in the operational VTS areas.

The article describes the implementation of modern marine technologies, such as virtual navigation aids and technologies of additional reality, which will significantly improve monitoring of the environment. Therefore, this introduction will reduce the risk of emergency. Ensuring the full spectrum of available methods is necessary to determine risk and protect bridges from accidents. Such approach will allow not only assess risk of ship collision with bridge, but also to introduce additional active control elements during navigation in dangerous zones.

Keywords: ship-bridge collision, accident, safety levels, identifying risks, prevent hazards, virtual navigation aids, technologies.

© Голіков А. О., Олійник Ю. А.

Статтю прийнято
до редакції 26.04.20

УДК 65.1

КОНТРОЛЛИНГ РАБОТЫ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МОРСКОГО ПОРТА

Зинченко С. Г., к.э.н., доцент Мариупольского института Межрегиональной академии управления персоналом, e-mail: fantomac99@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5055-7566

В статье рассмотрено применение метода контроллинга для оценки результативности функционирования транспортно-технологической системы (ТТС) морского порта, обслуживающего промышленно-аграрный Восточно-Украинский регион. В статье описан метод контроллинга эксплуатации ТТС морского порта, обслуживающего промышленно-аграрный регион Восточной Украины в условиях возрастающей конкуренции, дерегуляции объемов, номенклатуры и направлений грузопотоков, наличия суброгационного оборудования. Задачами данного исследования также является теоретическое развитие понятий «процессный» и «объектный» контроллинг. Исследована эволюция понятия «контроллинг», особенности развития данного метода применительно к работе процессов и объектов морских портов Украины в условиях постоянно возрастающей конкуренции, дерегуляции грузопотоков, наличия суброгационного оборудования. В результате исследования определены критерии эффективности системного контроля транспортного предприятия, что необходимо для оценки его затрат, разработаны практические мероприятия по применению метода контроллинга функционирования ТТС морского порта, обслуживающего промышленно-аграрный регион.

Ключевые слова: контроллинг, эксплуатация, система, порт, транспорт, технология, процесс, грузопоток, оценка, результативность.

DOI: 10.33815/2313-4763.2020.1.22.022-034

Состояние и актуальность вопроса. Контроллинг – комплексная система поддержки управления организацией, направленная на координацию взаимодействия систем менеджмента и контроля их эффективности [1].

В современной ТТС морского порта контроллинг включает в себя: управление рисками с учетом ограничений по пропускной способности порта; управление безопасностью; систему информационного оповещения; систему обеспечения; управление системой реализации стратегического, тактического и оперативного планирования и систему менеджмента качества с оценкой ключевых показателей процессов.

Метод контроллинга позволяет решать такие основные задачи:

- оценка реализации качественных и количественных параметров развития, установление целей, определение принципов рационального управления в конкретных условиях;
- анализ и исследование альтернативных стратегий, распределение по форме и мере ответственности среди персонала за выполнение определённых заданий стратегической программы;
- формирование критериальной основы оценок, отклонений, нормативных величин [2].

Контроллинг (от англ. Control – руководство, регулирование, управление, контроль) далеко не исчерпывается контролем. На сегодняшний день не существует однозначного определения понятия «контроллинг», но в обобщенном виде его можно представить как новую концепцию управления, порожденную практикой современного менеджмента [3].

Таким образом, контроллинг работы ТТС морского порта, с теоретической точки зрения, необходимо рассматривать как инструмент, позволяющий регулировать влияние на ее экономическое развитие в современных условиях дерегуляции морских перевозок грузов, острой конкуренции и наличия суброгационного оборудования.

В результате внедрения контроллинга будут наиболее рационально использоваться ресурсы ТТС морского порта, разработанные рекомендации для принятия управленческих решений. Поэтому для практики работы морских портов данное исследование актуально.

Постановка проблемы и анализ исследований. В основе контроллинга, как новой концепции системного управления организацией, лежит стремление обеспечить успешное функционирование организационной системы предприятия [3].

При этом важно в долгосрочной перспективе решить такие организационные задачи: координации и интеграции оперативных планов по разным бизнес-процессам; адаптации стратегических целей к изменяющимся условиям внешней среды; согласования оперативных планов со стратегическим планом развития; адаптации организационной структуры управления предприятием с целью повышения ее гибкости и способности быстро реагировать на меняющиеся требования внешней среды; создания системы обеспечения менеджеров информацией для различных уровней управления в оптимальные промежутки времени.

При этом также усложняется планирование инвестиционных и социальных проектов, мероприятий кластерного регионального развития [4].

Ритмичная работа морского порта нарушается, возникают технологические сложности, увеличивается себестоимость грузовых работ, что в итоге приводит к дополнительным простоям судов и грузов, срыву выполнения заказов клиентов порта [5].

Контроллинг обеспечивает методическую инструментальную базу для поддержки основных функций менеджмента: планирования, контроля, учета и анализа, а также оценки ситуации для принятия управленческих решений [3]. Методология контроллинга характеризуется его целями, принципами, подходами, инструментами и методами [6, 7].

Повышение роли науки и образования в обеспечении эффективности деятельности ТТС морских портов других стран приводит к реализации уникальных методов и стратегий, опыт которых может быть перенесен на национальный уровень [8].

Значительное влияние на использование технологий в стратегиях развития ТТС морских портов оказывают их размеры, по данным исследований [9, 10]. Синтез процессов и объектов в транспортных материальных потоках рассматривался в работе [11]. Основы транспортной эконометрии предложены К. Рихтером в работе [12].

На работу ТТС морского порта, обслуживающего промышленно-аграрный регион, оказывает значительное влияние дерегуляция номенклатуры, объемов и направлений материальных потоков грузов в зависимости от требований потребителей при наличии суброгационного оборудования. Это определяет все основные цели и задачи порта, в том числе стратегические, и является предметом контроллинга функционирования его ТТС.

Цель статьи. Описать метод контроллинга эксплуатации ТТС морского порта, обслуживающего промышленно-аграрный регион Восточной Украины в условиях возрастающей конкуренции, дерегуляции объемов, номенклатуры и направлений грузопотоков, наличия суброгационного оборудования. Задачами данного исследования также является теоретическое развитие понятий «процессный» и «объектный» контроллинг.

Основное содержание работы. Для ТТС морского порта важна результативная организация транспортного обслуживания клиентов и транспортных процессов, происходящих внутри нее. В современных условиях это невозможно сделать без разработки научных основ и методов обеспечения эффективного функционирования ТТС, рациональной организации перевозок грузов прилегающего промышленно-аграрного региона.

Контроллинг ориентирует ТТС морского порта на рациональную и эффективную работу в долгосрочной перспективе; содействует формированию организационной структуры, ориентированной на достижение долгосрочных целей; обеспечивает интерактивность планирования во времени, контроля исполнения и принятия корректирующих решений.

Подобно кругу Деминга для систем управления, контроллинг также имеет свой цикл, который включает в себя этапы планирования, контроля исполнения и принятия корректирующих решений.

Этап планирования в рамках цикла контроллинга осуществляется по технологии «встречных потоков»: сначала планирование производится «сверху вниз» (разработка методики планирования, координация и детализация планов по уровням). Затем идет встречный поток «снизу вверх». Этап контроля отклонений плана и факта предусматривает анализ фактических данных по контролируемым величинам и выработку мероприятий по устранению отклонений в пределах, определенной ему компетенции [3].

Вырабатывая альтернативные варианты в принятии управленческих решений, контроллинг подготавливает широкий спектр возможных путей реализации намеченных целей с обоснованиями и комментариями каждого. При этом право выбора того или иного предлагаемого варианта остается за руководителем предприятия [13].

Таким образом, в качестве основного метода научного исследования ТТС морского порта, состоящего в познании ее как единого целого, в единстве и взаимной связи ее частей, с их анализом и обобщением, положен контроллинг.

Теоретическую систему контроллинга работы ТТС морского порта составляет эффектометрия – понятие, которое комплексно отображает критерии обоснования различных эффективностей, управленческих решений и возможность их измерения на многокритериальной основе. Интеграция различных аспектов функционирования ТТС дает возможность получения общего синергетического эффекта, превосходящего сумму отдельных эффектов. Отмечено, что эффектометрическая полезность всех процессных элементов системы составляется из эффектометрической полезности каждого из этих элементов при условиях минимума затрат всех эффектометрических показателей [14].

На рис. 1 представлена схема организации контроллинга работы ТТС морского порта.



Рисунок 1 – Схема организации контроллинга работы ТТС предприятия

Следует использовать новые подходы к контроллингу работы ТТС. Так, необходимо различать понятия «процессный контроллинг» и «объектный контроллинг». При этом оценка работы таких сложных ТТС, какой в настоящий момент является морской порт, возможна только на многокритериальной основе [5, 11].

Суть процессного контроллинга состоит в том, что исследованиям подвергаются процессы ТТС, начиная от макроуровневых (региональных, межотраслевых) доходя до параметров и свойств микроуровневых процессов конкретного предприятия – морского порта. Процессную основу ТТС морского порта составляют технологии выполнения в пространстве и во времени операций, обеспечивающих эффективную транспортировку различных видов грузов, с сохранением их количества, качества и поддержанием функциональных свойств во всем производственном цикле.

Концепция объектного контроллинга заключается в представлении и исследовании ТТС на принципах ее декомпозиции на отдельные, взаимодействующие между собой элементы со структуризацией и исследованием функций каждого, установлением параметров их работы. Затем осуществляется композиция ТТС морского порта, где все ее субъекты управления действуют компромиссно на основе экономической заинтересованности, с акцентированием внимания на результативность и безопасность работы.

В табл. 1 приведены основные показатели работы ТТС морского порта, обслуживающего промышленно-аграрный регион и единицы их измерения.

Таблица 1 – Показатели работы ТТС морского порта

<i>Показатель</i>	<i>Ед. измерения</i>
1	2
- объем грузопотока за определенный промежуток времени	м ³ /ч
- номенклатура, физические свойства перегружаемых грузов	т, м ²
- эксплуатационно-технические характеристики, кот. зависят от вида объекта	– т/ч
- пропускная способность отдельных элементов, технологических линий	доли 1, %
- надежность объектов и элементов системы	ч
- непрерывность работы	т, т/ч
- максимальная грузоподъемность и производит. грузовых единиц	ч, м/с
- цикличность грузовых операций, скорость выполнения работ	баллы
- безопасность, качество доставки, контроль состояния грузов	%
- сохранность грузов	год, ч
- время цикла транспортного процесса (ПРР)	м ³ , га, %
- вместимость складских помещений	%
- степень механизации	ед.
- количество причалов	т/м ²
- распределение нагрузок на причальные линии	ч
- ремонтные циклы транспортно-технологического оборудования	кВт, л, м ³
- потребление природно-энергетических ресурсов, энергозатраты	м, %
- глубина акватории порта и подходных каналов, заносимость каналов	шт.
- наличие специализированных и унифицированных причалов, территорий	шт.
- количество припортовых станций и логистических комплексов	ПДК
- степень загрязнения окружающей среды (вода, воздух, земля)	чел./год
- количество несчастных случаев при выполнении грузовых работ	%
- уровень автоматизации основных производственных процессов	баллы
- ледовая обстановка в районе порта в зимних условиях	–
- согласованные с участниками тарифы на перевозку грузов	усл.ед.цены
- инновации, инвестиции в новые объекты и технологии	у.е.ц./т
- затраты на освоение плановых, перспективных грузопотоков	баллы

Продолжение табл. 1

1	2
- конкурентная среда, уровень развития прилегающих регионов	ед., баллы
- согласование интересов участников транспортного процесса	ед., баллы
- дополнительный сервис, доработка, сортировка груза и т.п.	ед.
- квалификация персонала и структура управления	баллы
- сменяемость (текучесть) кадров	чел, %
- разработанные РТК, ТТИП, другая нормативная документация	ед.
- выполнение требований международных стандартов и соглашений	баллы, %
- количество инцидентов в границах портовых вод	ед.
- оплата по налогам и дивидендам	у.е.ц., %
- комплексные показатели деятельности (ЕБИТДА, SWOT, др.)	у.е.ц./т, %
- научно-исследовательский подход к организации труда	баллы
- выставленные претензии, судебные иски, админ. предписания	ед.
- социально-бытовые условия работы, производственная гигиена	баллы
- температура окружающей среды	°С
- влажность воздуха, осадки	мм
- сила (скорость) ветра	м/с
- эргономика зданий, сооружений, территории и акватории	баллы

Анализ данных табл. 1 показывает, что показатели работы ТТС морского порта очень разные, поэтому их необходимо сгруппировать по видам эффективности [15]. В результате основной показатель – грузооборот морского порта зависит от множества других величин.

Теоретические основы связей процессного контроллинга представлены на рис. 2.

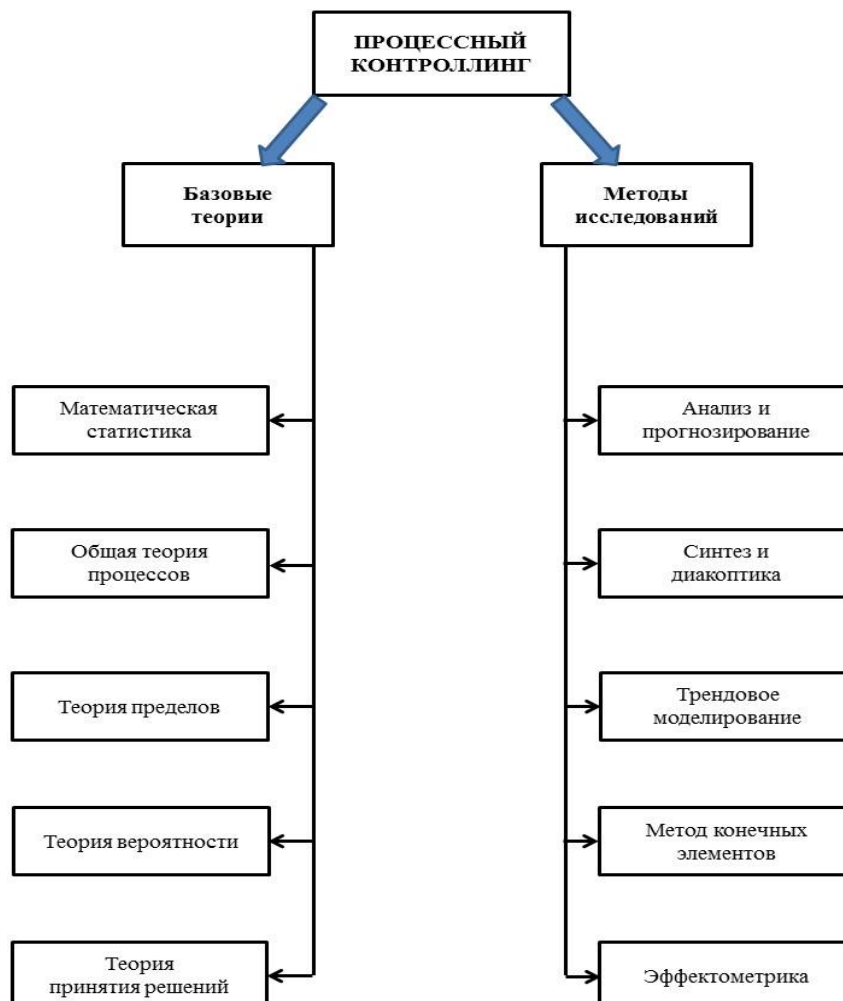


Рисунок 2 – Теоретические основы связей процессного контроллинга

Под контроллингом бизнес-процесса отдельные исследователи подразумевают мониторинг процессных показателей и анализ структуры процесса, а также эффективности работы его участников [16]. Можно дополнить, что если процесс измеряется, то его можно совершенствовать, поскольку все процессы цикличны, что характерно для ТТС порта.

При контроллинге процессов большое внимание уделяется анализу показателей результативности, качественной и эффективной организации управления, четкому взаимодействию структурных подразделений, равномерности загрузки исполнителей работ.

Объектный контроллинг фокусируется на показателях работы тех или иных объектов – частей общей ТТС морского порта. Применяются отдельные методы и показатели контроллинга для: анализа показателей обслуживания клиентов, оценки работы персонала, измерения конструктивных и эксплуатационных показателей объектов ТТС порта.

Основные элементы функционирования контроллинга в жизненном цикле элементов транспортной системы представлены в работе [17]. В табл. 2 приведены основные показатели работы и единицы измерения некоторых объектов ТТС морского порта.

Строятся поля резерва для оценки возможностей каждого из объектов и ТТС морского порта в целом, что демонстрирует возможности их работы в условиях конкурентной борьбы, дерегуляции грузопотоков, наличия суброгационного оборудования [4]. Важную роль для повышения результативности ТТС порта играет стабильная и четкая организация ее работы.

Таблица 2 – Показатели работы некоторых объектов ТТС морского порта

<i>Тепловоз железнодорожного цеха</i>			
<i>Конструктивные показатели</i>	<i>Единицы измерения</i>	<i>Эксплуатационные показатели</i>	<i>Единицы измерения</i>
1	2	3	4
- грузоподъемность	т	- объем перевозок	т
- габаритные размеры	м	- производительность	т/ч
- объемы и вместимость ТС	м ³ , т	- надежность	доли 1, %
- количество осей	шт.	- непрерывность работы	ч
- осевая нагрузка	т	- качество	баллы
- скорость	м/с	- ритмичность доставки	ч
- ускорение	м ² /с	- энергоэффективность	кВт/ч, л/ч
- тормозной путь	м	- экологичность	ПДК
- мощность двигателя (-ей)	кВт	- стоим. использования	усл.ед.цены
- ресурс двигателя	кВт,мощочас	- ремонтпригодность	ч
- вид топлива	–	- себестоимость ПРР	у.е.ц./т
- расход энергии, топлива	кВт/ч, л/ч	- осадки, влажность	мм
- собственный вес	т	- температура окр. среды	°С
- макс. преодолеван. подъем	град., %	- скорость ветра	м/с
- коэф. сопрот. движению	доли 1, %	- управляемость	–
- материал корпуса	–	- время и плавность тяги	с
- сохранность груза	%	- степень механизации	%
- срок службы	год	- преодолеваемые уклоны	град., %
- максимальный пробег	км/год	- количество персонала	чел.
- количество, протяж. путей	шт., км	- номенклатура грузов	–

Продолжение табл. 2

1	2	3	4
Буксир портового флота			
Конструктивные показатели	Единицы измерения	Эксплуатационные показатели	Единицы измерения
- грузоподъемность	т	- объем перевозок	т
- осадка	м	- производительность	т/ч
- скорость	м/с	- надежность	доли 1, %
- ускорение	м ² /с	- непрерывность работы	ч
- мореходность	—	- качество	баллы
- габаритные размеры	м	- ритмичность доставки	ч
- остойчивость	%, мм	- энергоэффективность	кВт/ч, л/ч
- вместимость трюмов	м ³	- экологичность	ПДК
- собственный вес	т	- стоим. использования	усл.ед.цены
- максим. крен, дифферент	%	- ремонтпригодность	ч
- мощность двигателя (-ей)	кВт	- себестоимость ПРР	у.е.ц./т
- ресурс двигателя	кВт,моточас	- осадки, влажность	мм
- вид топлива	—	- температура окр. среды	°С
- расход топлива	л/ч(км),кВт/ч	- скорость ветра	м/с
- материал корпуса	—	- маневренность	—
- сохранность груза	%	- время и плавность хода	с
- срок службы	год	- степень механизации	%
- коэф. сопрот. движению	доли 1, %	- волнение поверх. воды	баллы
- максим. время плавания	км/год	- количество персонала	чел.
- кол-во, длина фарватеров	шт., км	- номенклатура грузов	—
Кран порталный грузового района			
Конструктивные показатели	Единицы измерения	Эксплуатационные показатели	Единицы измерения
- грузоподъемность	т	- объем перегружаемых грузов	т
- вылет стрелы	м.	- производительность	т/ч
- собственный вес	т	- надежность	доли 1, %
- скорость движения	м/с	- непрерывность работы	ч
- ускорение	м ² /с	- качество	баллы
- тормозной путь	м	- ритмичность доставки	ч
- коэф. сопрот. движению	доли 1, %	- энергоэффективность	кВт/ч, л/ч
- мощность двигателя (-ей)	кВт	- экологичность	ПДК
- ресурс двигателя	кВт,моточас	- стоим. использования	усл.ед.цены
- вид энергии (топлива)	—	- ремонтпригодность	ч
- расход энергии	л/ч(км),кВт/ч	- себестоимость ПРР	у.е.ц./т
- габаритные размеры	м	- осадки, влажность	мм
- макс. преодолеваемый подъем	град., %	- температура окр. среды	°С
- объем и вместимость ковша	м ³ , т	- скорость ветра	м/с
- противовес	т	- маневренность	—
- материал кузова	—	- время и плавность хода	с
- сохранность груза	%	- степень механизации	%
- срок службы	год	- преодолеваемые уклоны	град., %
- максимальная длина тросов	м	- количество персонала	чел.
- количество, протяж. дорог	шт., км	- номенклатура грузов	—

Из данных табл. 2 следует, что отдельные показатели работы объектов ТТС порта практически аналогичны и могут быть сгруппированы с целью дальнейшего анализа. В то же время каждый из объектов имеет свои уникальные, отличающиеся и присущие только ему характеристики, которые можно сравнивать с аналогичными, например, у конкурентов.

Прогнозные тренды расчета контроллинга работы ТТС морского порта могут быть заданы в виде полиномиальной, логарифмической либо иного вида функции.

Контроллинг обеспечивает информацией, оценку сильных и слабых сторон центров ответственности, которыми являются: менеджеры, конструкторы, производство, технологи, испытатели, органы технического контроля, представительство заказчика, органы эксплуатации и другие [18]. Поэтому контроллинг распространяется на всех стейкхолдеров, заинтересованных в результативной работе ТТС морского порта.

В общем виде математическая модель эффективности контроля \mathcal{E}_k в системе жизненного цикла работы ТТС, в виде экономии затрат по стоимости C и времени T при ограничении суммарных затрат C_i и T_i на контроллинг определенных i -х этапов жизненного цикла работы ТТС морского порта может иметь вид [18, 19]:

$$\mathcal{E}_k = f(C, T), \text{ при } C \leq \sum C_i, T \leq \sum T_i. \quad (1)$$

В качестве технического критерия эффективности системного контроля можно принять выходной эффект Q контроля, равный разности ΔW между заданным W_3 и текущим W значениями эффективности объекта, а также затраты S на достижение эффекта.

Процесс оценивания затрат на системный контроль качества и надежности изделия в общем виде можно описать следующей системой уравнений [19]:

$$C = \sum_{i=1}^N (C_{oi} + \Delta C_i), \Delta C_i = \Delta C_i(n_i), \quad (2)$$

$$T = \sum_{i=1}^N t_i(n_i), W_i = W_i[n_i, W_{i-1}, A_i], A_i = A_i(C_i), \quad (3)$$

где C, T – соответственно, суммарная стоимость и длительность реализации комплексной программы контроля качества и надежности работы ТТС; N – число этапов контроля качества и надежности; t_i – время i -го этапа; n_i – число испытаний (ККН) на i -м этапе; W_i – эффективность на i -м этапе; A_i – параметры, зависящие от структуры процесса контроля и характеризующие изменение эффективности на i -м этапе; $C_{oi}, \Delta C_i$ – соответственно базовые и текущие затраты на i -м этапе.

Для ТТС рациональной является следующая постановка задачи оптимизации [19]:

$$T = \min_u, W_N \geq W_3, C \leq C_3. \quad (4)$$

Экспоненциальная модель динамики эффективности ТТС морского порта на i -м уровне системного контроля по времени τ_i может иметь вид [18]:

$$W_i(\tau_i) = a_i - (a_i - W_{oi}) \exp\{-\theta_i \tau_i\}, \quad (5)$$

где a_i – предельное значение эффективности для данного i -го уровня; W_{oi} – значение эффективности к началу i -го уровня контроля.

На рис. 3 представлена последовательность процессного контроллинга ТТС.

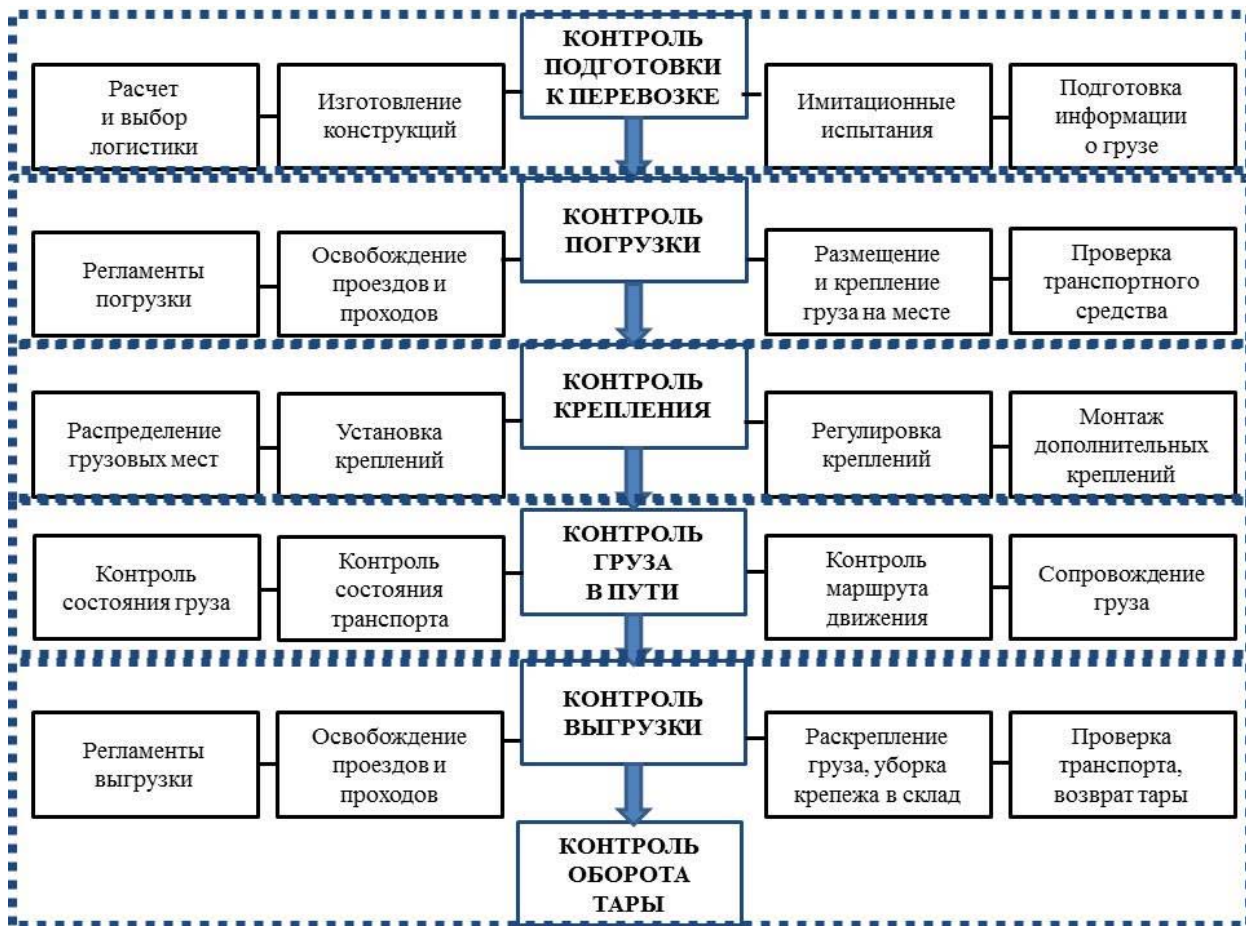


Рисунок 3 – Последовательность процессного контроллинга ТТС

Если обозначить через q долю дефектных параметров объектов в системе, то оперативная характеристика плана процессного контроля, основанного на однократной выборке $\pi(q)$, может определяться по формуле [19]:

$$\pi(q) = \sum_{i=0}^r C_n^i q^i (1-q)^{n-i}, \quad (6)$$

где r – максимально допустимое число дефектных параметров в выборке, при появлении которого ТТС функционирует в нормальном режиме; q – доля дефектных параметров объектов в системе; C_n^i – число сочетаний из n по i .

По результатам процессного контроллинга ТТС морского порта может приниматься одно из следующих трех решений:

- 1) принять оставшуюся часть параметров без дальнейшего процессного контроля;
- 2) отвергнуть оставшуюся непроверенную часть системы без процессного контроля;
- 3) провести сплошной процессный контроль оставшейся части ТТС, разделив таким образом, объекты в системе на нормальные и дефектные, и принять нормальные.

На практике такое допущение оправдано при выборке $n \geq 0,1N$.

Предприятие не может осуществить 100% сплошной процессный контроль параметров всех своих объектов. Поэтому в тех случаях, когда общие расходы, связанные со сплошным контроллингом системы велики либо контроль носит разрушающий характер, применяется выборочный контроль [20].

Также для обеспечения процессного контроля применяется экспертное ранжирование по приоритетам и балльная оценка объектов [21].

Возможности ТТС морского порта ограничены: применяемыми технологиями, основными природно-энергетическими характеристиками объектов и выполняемых работ,

уровнем квалификации работников, имеющимися у него техническими ресурсами, подтвержденным планом завоза грузов [4].

Очевидно, что все данные ограничения, а также внешнее воздействие со стороны государственных и региональных структур, являются существенным дерегулирующим фактором и источником напряженности в работе ТТС морского порта; влияют на его функциональную результативность, обусловленную эффективностью, экономическое и социальное развитие, а также на охрану окружающей среды.

Выводы и перспективы дальнейших исследований

1. Получили дальнейшее развитие теоретические понятия «процессный контроллинг» и «объектный контроллинг».

2. На основе сложившихся грузопотоков в ТТС морского порта, обслуживающего промышленно-аграрный регион Восточной Украины, и с целью результативного совершенствования данной системы в качестве одного из основных методов исследований предложен контроллинг, который основан на процессном подходе.

3. В качестве теоретической основы контроллинга работы ТТС морского порта приняты принципы эффектометрики, которые комплексно отображают критерии обоснования различных эффективностей, управленческих решений и возможность их измерения на многокритериальной основе.

4. Определены критерии эффективности системного контроля транспортного предприятия, что необходимо для оценки его затрат.

5. Разработаны практические мероприятия по применению метода контроллинга функционирования ТТС морского порта, обслуживающего промышленно-аграрный регион.

6. Результаты данного исследования метода контроллинга эксплуатации ТТС морского порта могут быть использованы в теоретических разработках и практике деятельности различных транспортных компаний.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сайт Википедии / Контроллинг. URL : <https://ru.wikipedia.org/wiki/>. (дата обращения 08 января 2020).

2. Стратегический контроллинг – Контроллинг процессов хозяйственной деятельности / Библиотека русских учебников. URL : <http://uchebnikirus.com>. (дата обращения 10 января 2020).

3. Справочник для экономистов. URL : <http://www.catback.ru/articles/theory/control/controlling.htm>. (дата обращения 13 января 2020).

4. Зинченко С. Г. Оценка предела эффективности работы транспортно-технологической системы морского порта в летний период. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. Херсон : ХДМА, 2018. № 1 (18). С. 10–17.

5. Зинченко С. Г. Контроллинг эксплуатации и ремонта объектов транспортно-технологической системы морского порта в условиях дерегуляции перевозки грузов и наличия суброгационного оборудования. Мариуполь : ООО «ППНС», 2017. 159 с.

6. ТИПЫ КОНТРОЛЛИНГА / Антикризисное управление: Шпаргалка. URL : www.k2x2.info. (дата обращения 09 января 2020).

7. НОУ ИНТУИТ / Лекция. Реализация стратегии и контроль. URL : www.intuit.ru. (дата обращения 10 января 2020).

8. Wiśnicki Bogusz, Kujawski Artur. Conditions for developing a port city transport infrastructure illustrated with the example of Szczecin agglomeratio. *Transportation Research Procedia: 2nd International Conference «Green Cities – Green Logistics for Greener Cities»*. (2–3 March 2016). Szczecin, Poland, 2016. № 16. P.566-575.

9. Michael Gogas, Giannis Adamos, Eftihia Nathanail. Assessing the performance of intermodal city logistics terminals in Thessaloniki. *Transportation Research Procedia: 3rd*

Conference on Sustainable Urban Mobility, (26–27 May 2016), Volos, Greece. 2017. № 24. P. 17–24.

10. Ports strategy and logistics challenges: What are the levers for long term vitality? – TDIE Research Council / by Antoine Frémont, Claude Gressier and Pierre Van Cornewal. 56 p. URL : <http://tdie.eu/wp-content/uploads/2017/01/Ports-strategy-and-logistics-challenges-TDIE-report-Oct.-2016.pdf>. (accessed 26.12.2019).

11. Берестовой А. М. Синтез процессов и объектов в материальных потоках транспорта затвердевающих жидкостей : дисс. ... доктора техн. наук: 05.22.12. Луганск, 2002. 542 с.

12. Рихтер К. Ю. Транспортная эконометрия (пер. с нем.). Москва : Транспорт, 1982. 317 с.

13. Экономика и менеджмент. Статьи и учебные материалы / Контроллинг. Основные функции. URL : <http://topknowledge.ru/osnovmen/1002-funksii-kontrollinga.html>. (дата обращения 15 января 2020).

14. Берестовой А. М., Зинченко С. Г., Хлестова О. А. Факторы, влияющие на работу транспортно-технологической системы промышленно-аграрного региона Восточной Украины в условиях дерегуляции грузопотоков. *Вісник ПДТУ. Технічні науки*. Маріуполь, 2019. Вип. 38. С. 204–210.

15. Зинченко С. Г., Хлестова О. А., Хлопецкая Л. Ф. Моделирование на многокритериальной основе оценки факторов, обеспечивающих эффективную работу транспортных объектов морского порта. *Вісник ПДТУ. Технічні науки*. Маріуполь, 2018. Вип. 37. С. 209–216.

16. Коптелов А. К. Контроллинг бизнес-процессов: от теории к практике. URL : <http://koptelov.info/publikatsii/controlling-business-processov/>. (дата обращения 16 января 2020).

17. Попович С. Н. Обеспечение сохранности элементов транспортного оборудования при морских перевозках : дисс. ... канд.техн.наук: 05.22.20. Одесса, ОНМА, 2010. 204 с.

18. Лихачева Г. Н. Информационные технологии в экономике: учебное пособие. Москва : МЭСИ, 1999. 112 с.

19. Александровская Л. Н., Круглов В. И., Кузнецов А. Г. и др.. Теоретические основы испытаний и экспериментальная обработка сложных технических систем. Москва : Лагос, 2003. 736 с.

20. Horvath P. Controlling, Vahlen. München, 2006.

21. Контроллинг : учебник / А. М. Карминский, С. Г. Фалько, А. А. Жевага, Н. Ю. Иванова; под ред. А. М. Карминского, С. Г. Фалько. Москва : Финансы и статистика, 2006.

REFERENCES

1. Sayjt Vikipedii / *Kontrolling*. URL : <https://ru.wikipedia.org/wiki/>. (data obratheniya 08 yanvaryaya 2020).

2. Strategicheskijj kontrolling – Kontrolling processov khozyayjstvennoy deyatelnosti / Biblioteka russkikh uchebnikov. URL : <http://uchebnikirus.com>. (data obratheniya 10 yanvaryaya 2020).

3. Spravochnik dlya ehkonomistov. URL : <http://www.catback.ru/articles/theory/control/controlling.htm>. (data obratheniya 13 yanvaryaya 2020).

4. Zinchenko S. G. Ocenka predela ehffektivnosti rabotih transportno-tekhnologicheskoyj sistemih morskogo porta v letniyj period. *Naukoviyj visnik Khersonskoj derzhavnoj morskoj akademii*. Kherson : KhDMA, 2018. № 1 (18). S. 10–17.

5. Zinchenko S. G. Kontrolling ehkspluatatsii i remonta objhektov transportno-tekhnologicheskoyj sistemih morskogo porta v usloviyakh deregulyatsii perevozki грузов i nalichiya subrogatsiyjnogo oborudovaniya. Mariupolj : ООО «PPNS», 2017. 159 s.

6. TIPIh KONTROLLINGA / Antikrizisnoe upravlenie: Shpargalka. URL : www.k2x2.info. (data obratheniya 09 yanvarya 2020).
7. NOU INTUIT / Lekciya. Realizaciya strategii i kontrolj. URL : www.intuit.ru. (data obratheniya 10 yanvarya 2020).
22. Wiśnicki Bogusz, Kujawski Artur. Conditions for developing a port city transport infrastructure illustrated with the example of Szczecin agglomeratio. *Transportation Research Procedia: 2nd International Conference «Green Cities – Green Logistics for Greener Cities»*. (2–3 March 2016). Szczecin, Poland, 2016. № 16. P.566-575.
23. Michael Gogas, Giannis Adamos, Eftihia Nathanail. Assessing the performance of intermodal city logistics terminals in Thessaloniki. *Transportation Research Procedia: 3rd Conference on Sustainable Urban Mobility*, (26–27 May 2016), Volos, Greece. 2017. № 24. P. 17–24.
24. *Ports strategy and logistics challenges: What are the levers for long term vitality?* – TDIE Research Council / by Antoine Frémont, Claude Gressier and Pierre Van Cornewal. 56 p. URL : <http://tdie.eu/wp-content/uploads/2017/01/Ports-strategy-and-logistics-challenges-TDIE-report-Oct.-2016.pdf>. (acceded 26.12.2019).
11. Berestovoyj A. M. *Sintez processov i objhktov v materialjnihkh potokakh transporta zatverdevayuthikh zhidkosteyj* : diss. ... doktora tekhn. nauk: 05.22.12. Lugansk, 2002. 542 s.
12. Rikhter K. Yu. *Transportnaya ehkonometriya* (per. s nem.). Moskva : Transport, 1982. 317 s.
13. Ehkonomika i menedzhment. Statji i uchebnihe materialih / Kontrolling. Osnovnihe funkcii. URL : <http://topknowledge.ru/osnovmen/1002-funktsii-kontrollinga.html>. (data obratheniya 15 yanvarya 2020).
14. Berestovoyj A. M., Zinchenko S. G., Khlestova O. A. Faktorih, vliyayuthie na rabotu transportno-tekhnologicheskoyj sistemih promishlenno-agrarnogo regiona Vostochnoyj Ukrainih v usloviyakh deregulyacii gruzopotokov. *Visnik PDTU. Tekhnichni nauki*. Mariupolj, 2019. Vip. 38. S. 204–210.
15. Zinchenko S. G., Khlestova O. A., Khlopeckaya L. F. Modelirovanie na mnogokriterialnoj osnove ocenki faktorov, obespechivayuthikh ehffektivnyu rabotu transportnihkh objhktov morskogo porta. *Visnik PDTU. Tekhnichni nauki*. Mariupolj, 2018. Vip. 37. S. 209–216.
16. Koptelov A. K. Kontrolling biznes-processov: ot teorii k praktike. URL : [dhttp://koptelov.info/publikatsii/controlling-business-processov/](http://koptelov.info/publikatsii/controlling-business-processov/). (data obratheniya 16 yanvarya 2020).
17. Popovich S. N. Obespechenie sokhrannosti ehlementov transportnogo oborudovaniya pri morskikh perevozkakh : diss. ... kand.tekhn.nauk: 05.22.20. Odessa, ONMA, 2010. 204 s.
18. Likhacheva G. N. Informacionnihe tekhnologi v ehkonomike: uchebnoe posobie. Moskva : MEhSI, 1999. 112 s.
19. Aleksandrovskaya L. N., Kruglov V. I., Kuznecov A. G. i dr.. Teoreticheskie osnovih ispihtaniyj i ehksperimentaljnaya obrabotka slozhnihkh tekhnicheskikh sistem. Moskva : Lagos, 2003. 736 s.
20. Horvath P. *Controlling*, Vahlen. Munchen, 2006.
21. Kontrolling : uchebnik / A. M. Karminskiyj, S. G. Faljko, A. A. Zhevaga, N. Yu. Ivanova; pod red. A. M. Karminskogo, S. G. Faljko. Moskva : Finansih i statistika, 2006.

Зінченко С. Г. КОНТРОЛІНГ РОБОТИ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ МОРСЬКОГО ПОРТУ

У статті розглянуто застосування методу контролінгу для оцінки результативності функціонування транспортно-технологічної системи (ТТС) морського порту, що обслуговує промислово-аграрний Східно-Український регіон.

При контролінгу процесів велика увага приділяється аналізу показників результативності, якісній та ефективній організації управління, чіткій взаємодії структурних підрозділів, рівномірності завантаження виконавців робіт.

Досліджено еволюцію поняття «контролінг», особливості розвитку даного методу стосовно роботи процесів і об'єктів морських портів України в умовах зростання конкуренції, дерегуляції вантажопотоків, наявності суброгаційного обладнання.

Теоретичну систему контролінгу роботи ТТС морського порту становить ефектометрика. Отримали подальший розвиток теоретичні поняття «процесний контролінг» та «об'єктний контролінг».

Визначено критерії ефективності системного контролю транспортного підприємства, що потрібно для оцінки його витрат.

Розроблено практичні заходи щодо застосування методу контролінга функціонування ТТС морського порту, що обслуговує промислово-аграрний регіон.

Ключові слова: контролінг, експлуатація, система, порт, транспорт, технологія, процес, вантажопотік, оцінка, результативність.

Zynchenko S. H. CONTROL OF TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL SYSTEM OF A SEA PORT

The article discusses the application of the controlling method which is aimed to assess the performance of the transport and technological system (TTS) of a seaport serving the industrial-agricultural East Ukrainian region. In the course of controlling processes, much attention is being paid to the analyses of performance indicators, high-quality and efficient management organization, clear interaction of structural divisions as well as uniformity of work performers. The paper is devoted to studying the evolution of the concept of «controlling», features of the development of this method in relation to the operation of processes and objects of seaports in Ukraine against the background of the competitive environment escalation, deregulation of cargo traffic, and the availability of subrogation equipment. The theoretical system of controlling the work of the TTS of the seaport is made up of effectometrics. The theoretical concepts of «process controlling» and «object controlling» were further developed. The criteria for the effectiveness of the system control of a transport company are determined, which is considered to be highly necessary in order to assess the company's expenses. Practical measures with reference to the application of the method for controlling the functioning of the TTS in a seaport, which serves the industrial and agricultural region, have been developed.

Keywords: controlling, operation, system, port, transport, technology, process, freight traffic, evaluation, performance.

© Зінченко С. Г.

Статтю прийнято
до редакції 12.02.20

ДО ПРОБЛЕМИ СТРЕСОСТІЙКОСТІ МАЙБУТНІХ ОФІЦЕРІВ МОРСЬКОГО ФЛОТУ

Кальба Я. Є., к.психол.н., доцент, доцент кафедри психології Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка, Україна, e-mail: yarka35@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0589-9126

Розглянуто сутність та значення поняття «стресостійкості» в професійній діяльності майбутніх офіцерів морського флоту. Стресостійкість визначено як індивідуальну здатність особистості моряка зберігати адекватну працездатність під час дії стресора. Доведено, що низька стресостійкість призводить до емоційних порушень офіцерів морського флоту, зниження фізіологічної та психічної опірності в екстремальних умовах професійної ситуації. Розкрито ряд соціальних та особистісних чинників впливу на переживання стресорів. Розглянуто вагомність особистісних ресурсів майбутніх моряків, які можуть підсилювати або послаблювати їх стресові реакції, впливаючи на їх тип, інтенсивність та тривалість. Обґрунтовано припущення, що активне відношення до життя, чітко диференційовані цілі, суб'єктно-вчинкові інтенції, наміри, готовність і спроможність обирати, локус контролю, відповідальність за власне життя, життєві стратегії, життєтворчість тощо, забезпечують психологічну стійкість у стресових ситуаціях. Результати емпіричного дослідження показали, що найбільше значення курсанти (68 %) відводять результативності власного життя, власній самооцінці пройденого етапу життя, його продуктивності, змістовності. Невисокими виявилися показники досліджуваних за шкалами внутрішнього локусу контролю, що може співвідноситися з низькими значеннями показників у респондентів за параметром: «завершеність ситуації – відсутність перспективи». Відтак, зневіра у можливість контролювати події власного життя, елементи фаталізму спричиняють залежність від даної ситуації. Зроблено висновок щодо актуальності у морських закладах вищої освіти вчасної діагностики, а в подальшому й корекції психологічних особистісних чинників курсантів, які є вагомими ресурсами стресостійкості та забезпечують необхідний рівень індивідуальної психічної опірності в екстремальних умовах професійної ситуації.

***Ключові слова:** стрес, стресостійкість, копінг, соціальні чинники стресостійкості, особистісні чинники стресостійкості, особистісні ресурси.*

DOI: 10.33815/2313-4763.2020.1.22.035-044

Постановка проблеми. Морський транспортний комплекс є невід'ємною, багатофункціональною інфраструктурою держави, що задовольняє основні потреби національної економіки у транспортному забезпеченні. Відтак, ефективність його функціонування, рівень відповідності системи управління та розвитку сучасним міжнародним вимогам утворює конкурентоспроможність на світовому ринку. Професійна діяльність моряків далекого плавання супроводжується систематичними соціально-психологічними ризиками та викликами. Специфіка праці моряків передбачає суттєві наднормові навантаження через професійно зумовлений оксидативний, дисрегулятивний, емоційний та психосоціальний стрес [1, 2]. У цьому контексті актуалізується проблема безпеки морського судноплавства, зокрема шляхом дієвого протистояння явищу «людський фактор», про що мовиться у змісті 19 Резолюції та Заключному акті Міжнародної (Манільської) конференції країн-учасниць Міжнародної конвенції ПДНВ (1978/1995) від червня 2010 року [3].

За таких умов компетенції офіцерів морського флоту повинні охоплювати не лише фахові знання та навички, а й високу психоемоційну стійкість, достатній потенціал психосоматичного здоров'я.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблему психологічної підготовки майбутніх моряків до роботи й потенційних ризиків у морі представлено різними авторами. Насамперед, учені звертають увагу на причини хронічної втоми морських фахівців, що спонукають їх до професійних помилок та аварійних ситуацій. Основний акцент робиться на психологічних аспектах управлінської діяльності на борту судна, що являє собою специфічну морську соціотехнічну систему в екстремальних ситуаціях. Професійна діяльність офіцерів морського флоту вимагає високої швидкості розумових процесів,

специфічної зосередженості, переключення та розподілу уваги, розвинених сенсомоторних навичок, високої нервово-психічної стійкості та мотивованості [4, 5].

В умовах постійного дефіциту часу, високої динамічності та об'ємності інформації, що надходить з різних каналів зв'язку, стан високої психічної напруженості моряків стає фрустраційним фактором. При значних психоемоційних навантаженнях, викликаних існуванням реальної вітальної загрози, вплив психогенних чинників викликає негативні зміни в структурі особистісних якостей. Найбільш ураженою стає емоційна сфера, як результат – порушується регуляція пізнавальної сфери та поведінки. Низький рівень адаптаційних можливостей, низька стресостійкість – основні суб'єктивні причини, що призводять до емоційних порушень офіцерів морського флоту, зниження фізіологічної та психічної опірності в екстремальних умовах професійної ситуації.

На думку Л. Шафрана та В. Голикової, професійна діяльність моряків далекого плавання вимагає від них поєднання щонайменше двох альтернативних психофізіологічних здатностей: з одного боку – спроможності до інтенсивних фізичних і психоемоційних навантажень у складних навігаційних і погодних умовах, з іншого – стійкості до монотонії, гіподинамії, полідепривації в океанічному плаванні, в ситуації замкненого простору та обмеженої комунікації. Означені особливості морської діяльності складають основу психоемоційного стресу, зниження працездатності, професійно-орієнтованої мотивації, а також розвитку ознак астенії і депресії [6, С. 29].

Водночас результати досліджень указують на інконгруентність стресорів, пов'язаних з професійною діяльністю матросів та командного складу морського флоту. Аналізуючи вплив професійних ризиків на стан психічного здоров'я моряків далекого плавання, вчені (А. Mellbye, Т. Carter) доводять існування диференціації негативного впливу професійних стресфакторів залежно від рангу моряків [7, С. 108].

S. Roberts, P. Marlow, досліджуючи суїцидальну поведінку моряків, дійшли висновку, що «оскільки майже 90% самогубств трапляються серед матросів, інших робітників та обслуги судна, ризики суїцидальної поведінки значно асоційовані з професійним статусом і рангом моряка» [8, С. 172].

Дослідження D. Jegaden доводять, що середній бал схильності до нудьги (за однойменною шкалою Boredom Proneness Scale – BPS) серед офіцерів становить $8,4 \pm 5$ з медіаною = 7, а серед рядових матросів – $10,2 \pm 4,8$ з медіаною = 10. Відображено також суттєву кореляцію між показниками BPS та показниками депресії (серед офіцерів ($r = +0,85$), серед членів екіпажу ($r = +0,54$)) [9, С. 82].

Дослідження M. Oldenburg доводять, що офіцери більше схильні до стресових ризиків через властиву їм «...високу особисту відповідальність за екіпаж і корабель, постійну зміну вимог до роботи» [10, С. 96].

Означені результати досліджень не викликають сумнівів, що психоемоційне здоров'я морських офіцерів пов'язане з особливістю їх професійної діяльності. Поміж тим, науково не пояснюються, не обґрунтовуються фактори, що сприятимуть високому рівню психоемоційної стійкості моряка, його безпомилковому професійному реагуванню.

Мета статті – розглянути значення і сутність поняття «стресостійкості» та емпірично дослідити які особистісні фактори можуть впливати на її формування у майбутніх офіцерів морського флоту.

Виклад основного матеріалу. Професійна діяльність морських офіцерів охоплює увесь спектр психологічних характеристик і установок особистості, чинить вплив на психічні процеси, що формують поведінку, ставлення до оточення, міжособистісне спілкування, ставлення до себе, самооцінку. Професійне середовище занурює моряка у відповідні умови життєдіяльності, які зумовлюють його розвиток або ж навпаки – стагнацію, тривогу, незадоволеність, психосоматичну втому, і, як результат, спричинюють стрес. Характеристики соціального оточення виступають своєрідними модераторами стресу. Саме соціальна підтримка, задоволення потреби в близькості, захисті, інформації, розрядці, заспокоєнні впливає на характер поведінки людини після дії стресогенних

факторів. У рамках нашої роботи зупинимось детальніше на вивченні особистісних чинників подолання стресу.

Стрес як неспецифічний (адаптаційний) синдром Г. Сельє називає низкою функціональних і морфологічних змін, що розгортаються як єдиний процес, як феномен неспецифічної реакції організму у відповідь на різноманітні шкідливі впливи. Вчений виділяє три стадії цього процесу: стадію тривоги; стадію резистентності (адаптації); стадію виснаження. На першій стадії організм зіштовхується з якимось негативним фактором середовища й намагається пристосуватися до нього. На другій стадії відбувається адаптація до нових умов. Але якщо стресор продовжує діяти тривалий час, відбувається виснаження гормональних ресурсів (третя стадія), руйнація систем адаптації, процес приймає патологічний характер і може завершитися хворобою або летальним наслідком [11, С. 104].

Кожній людині властивий індивідуальний поріг чутливості до стресу – той рівень напруженості, при якому ефективність діяльності підвищується («eustress»), а також критичний поріг виснаження, коли ефективність діяльності знижується («distress»). Межі порогу чутливості до стресу визначаються поняттям «стресостійкості» – індивідуальною здатністю організму зберігати нормальну працездатність під час дії стресора. Основні труднощі у визначенні стресостійкості людини пов'язані з оцінкою її реакцій на психологічні фактори. Якщо відносно легко можна ідентифікувати критерії стійкості людини стосовно стресорів фізичної або хімічної природи (висока або низька температура, фізичне навантаження, токсичні речовини тощо), то зробити це щодо психологічних стресорів набагато складніше. У даному контексті важливу роль відіграють цінності, цілі, установки людини, її життєвий досвід [12].

Стресостійкість особистості можна розглядати також на соціально-психологічному рівні як: збереження здатності до соціальної адаптації; збереження значущих міжособистісних зв'язків; забезпечення успішної самореалізації, досягнення життєвих цілей; збереження працездатності; збереження здоров'я (Г. Никифоров) [13, С. 384].

Окреслений контекст визначення поняття «стресостійкості» дозволяє зробити висновок, що її збереження або підвищення для особистості пов'язано з пошуком ресурсів, на які вона зможе опиратися в подоланні негативних наслідків стресових ситуацій. Під ресурсами маємо на увазі внутрішні і зовнішні змінні, що сприяють психологічній стійкості в стресогенних ситуаціях.

Г. Сельє виділяє два види адаптаційних ресурсів людського організму при стресі: поверхнева адаптаційна енергія і глибинна адаптаційна енергія. Поверхневі ресурси організму активізуються на першу вимогу, вони легко відновлюються. Якщо відбувається відновлення адаптаційних ресурсів, то у хворобливий стан організм не переходить. Поверхнева адаптаційна енергія відтворюється завдяки глибинній, яка мобілізується шляхом адаптаційної перебудови гомеостатичних механізмів організму. Активізація глибинної адаптаційної енергії відбувається тоді, коли людина довго знаходиться в стресовій ситуації і виснажені поверхневі енергетичні ресурси. У деяких осіб темп включення «глибинних» ресурсів буває недостатнім для нейтралізації дії стресора, відповідно такі індивіди відрізняються зниженою стресостійкістю. Виснаження глибинних ресурсів призводить до старіння та смерті організму [11, С. 107].

Е. Фромм виділив три психологічні ресурси, що допомагають людині в подоланні важких життєвих ситуацій:

- надія – психологічна категорія, що сприяє життю і зростанню; активне очікування і готовність зустрітися з тим, що може з'явитися;
- раціональна віра – переконаність у тому, що існує велика кількість реальних можливостей і потрібно вчасно виявити ці можливості; раціональна інтерпретація теперішнього часу;
- душевна сила – мужність, здатність чинити опір, піддати небезпеці надію і віру, зруйнувати їх, перетворюючи на «голий оптимізм» або в ірраціональну віру [14, С. 340].

У цьому контексті вартим уваги видається питання копінгу, копінг-стратегій – характерних способів поведінки в різних стресогенних ситуаціях, які допомагають упоратися зі стресом. Ці стратегії можна розділити на дві групи: активні та регресивні стратегії виживання. Активні, чи як почасти їх називають, трансформаційні стратегії долаючої поведінки охоплюють здорові способи боротьби зі стресорами шляхом творчого пристосування або ж перетворення середовища з високим рівнем стресу у сприятливий життєвий досвід. Примітним видається те, що цілеспрямованість – ознака, яка властива особистостям з високим рівнем стресостійкості і спонукає їх до активної суб'єктно-вчинкової поведінки, без регресивних, нерезультативних копінг-стратегій [15, С. 21].

Вочевидь особистісні якості людини можуть підсилювати або послаблювати її стресові реакції, впливаючи на їх тип, інтенсивність та тривалість. Звідси, скажімо, постає залежність характеру копінг-поведінки (долаючої поведінки) від життєвої позиції, активності особистості, від потреб у самореалізації власного потенціалу і здібностей, зрештою від локусу контролю, що підтримує й динамізує стресостійкість людини в екстремальних умовах.

Тож робимо припущення: активне ставлення людини до життя, чітко диференційовані цілі, суб'єктно-вчинкові інтенції, наміри, готовність і спроможність обирати, внутрішній самоконтроль, відповідальність за власне життя, життєві стратегії, життєтворчість тощо сприяють більшій психологічній стійкості її в стресових ситуаціях. Відповідно, це відкриває перспективу цілеспрямованого формування у курсантів МЗВО належних особистісних ресурсів ще на етапі їх професійної підготовки, аби в подальшій професійній діяльності вони змогли на них опиратися й самостійно впливати на характер свого психофізичного стану, зокрема забезпечувати необхідний рівень індивідуальної психічної опірності в екстремальних умовах професійної ситуації.

Аби дослідити в емпіричній площині означені особистісні чинники стресостійкості, проведено пілотний експеримент. Вибірку дослідження склали курсанти Херсонської державної морської академії (100 осіб).

Респондентам було запропоновано методику «Малюнковий апперцептивний тест» (модифікований варіант тематичного апперцептивного тесту Г. Мюрея, адаптований Л. Собчик). Засадичним принципом вибору цієї методики слугував той, що поведінка людини в стресовій ситуації залежить не лише від об'єктивних характеристик ситуації, а й від суб'єктивного сприйняття даної ситуації за наступними параметрами: валентності (суб'єктивного значення ситуації, що впливає на її стресогенність і є індивідуально зумовленою); контрольованості (суб'єктивної оцінки здатності контролювати стресову ситуацію); мінливості (суб'єктивної оцінки того, що стресова ситуація зміниться самостійно); невизначеності; повторюваності; освіченості (міри власного досвіду переживання подібних ситуацій).

За допомогою цієї проєктивної методики з'ясувалися особливості реагування респондентів у межах заданої проблемної ситуації, способи самовизначення в ній, спроможність виявляти суб'єкту чи об'єкту орієнтацію тощо. Для опрацювання отриманого емпіричного матеріалу використано метод контент-аналізу.

Стимульний матеріал – вісім контурних малюнків із зображенням двох або трьох персонажів, ні вік, ні стать, ні соціальний статус яких визначити неможливо. Водночас пози, експресія жестів, особливості розміщення фігурок проєктують різні колізійні ситуації, що дозволяє виявити специфічні особливості уявлення респондентів про життєву ситуацію, в якій вони знаходяться, психологічну залежність від неї і зорієнтованість на суб'єктно-вчинкові способи її подолання.

Обстежуваним пропонувалася належна інструкція: «Послідовно, розглядаючи малюнки згідно з нумерацією, складіть за кожним із них невеличке оповідання, в якому повинні знайти відображення відповіді на такі запитання:

1. Що відбувається в даний момент?
2. Хто ці люди?

3. Про що вони думають і що відчувають?
4. Що призвело до цієї ситуації і чим вона завершиться?»

Обробка даних передбачала якісний та кількісний аналізи оповідань. Аналіз змістових аспектів оповідань курсантів дозволив визначити особливості обраних тем сюжетів та пов'язаних з ними тенденцій. Проекція респондентів особистісних переживань та ідентифікація з певним героєм оповідання дозволяла визначити:

- наявність колізії (протиріччя, суперечності);
- співвідношення емоційного та раціонального ставлення до ситуації;
- незавершеність сюжету оповідання чи відсутність перспективи тощо.

Теми сюжетів оповідань та пов'язані з ними тенденції:

1. Домінантність – прагнення впливати на людей, керувати ними.
2. Агресія – прагнення перемогти супротивника чи принизити його.
3. Знехтування – прагнення розірвати стосунки, брутальність, непоступливість.
4. Пошук дружби (кохання) – прагнення щирості, дружби, симпатії та любові.
5. Автономія – тенденція уникнення будь-яких обмежень, індивідуалізм.
6. Пристосування – пасивне підкорення зовнішнім силам, сором'язливість.
7. Солідність – прагнення підкорюватися сильній особистості, захоплюватися нею.
8. Успіх – прагнення швидкого та успішного досягнення мети.
9. Бажання бути в центрі уваги – прагнення справляти враження на інших.
10. Гра – оптимізм, активність, безтурботність та безвідповідальність.
11. Егоїзм – турбота про особистий успіх, хворобливе самолюбство.
12. Соціабельність – повага думки інших, турбота про інших, альтруїзм.
13. Пошук покровителя (опікуна) – потреба в порадах, ніжному звертанні.
14. Невпевненість у собі та у своїх перспективах.
15. Допомога іншим – відчуття жалю до інших, турбота про дітей, бажання допомогти, заспокоїти.
16. Уникнення покарання – намагання стримувати свої безпосередні прагнення, намагання бути вихованою людиною.
17. Самозахист – захист своїх прав, пошук винних серед оточення.
18. Порядок – намагання дотримуватися чистоти, підвищена акуратність.

Кількісний аналіз оповідань проводився із урахуванням виділених курсантами в оповіданні таких структурних елементів ситуації:

- a) виокремлення героїв із середовища;
- b) оцінка ситуації і героїв у ній;
- c) ідентифікація з героєм;
- d) усвідомлення (та переживання) героєм суперечності (проблемності) даної ситуації;
- i) завершеність ситуації – відсутність перспективи.

Статистична частота виділених структурних елементів усіх восьми ситуацій-оповідань визначалася за наступним зразком: a/8 : b/8 : c/8 : d/8 : i/8.

Якісний аналіз результатів отриманих даних відображено наступним чином у табл. 1. Однією з провідних сюжетних ліній письмових розповідей курсантів виявилася тема «пошуку дружби, кохання, взаєморозуміння». Пріоритет указаної тематики пояснює той факт, що дана вікова категорія респондентів – юність. У цьому віці важливе значення відіграє міжособистісне спілкування, що виражається, насамперед, у потребі емоційного контакту, розумінні, душевній близькості. Відповідно в оповіданнях спостерігається високий рівень ідентифікації окремих курсантів із «самовідданим» персонажем (бути повністю ширим, відкритим та відданим своїй справі, своїм друзям, коханій людині), що в тексті супроводжується своєрідною гіперболізацією образів. Дійсність у діапазоні характерних відносин проектується респондентами у двох крайнощах з однаковою інтенсивністю: позитивній – негативній. Відтак, змальована емоційна гіпербола діє у кардинально протилежних напрямках.

Таблиця 1 – Співвідношення використаних респондентами тем у відсотках

№	Використані курсантами теми оповідань	Відсотковий розподіл показників
1.	Пошук дружби і кохання	21 %
2.	Агресія	20 %
3.	Домінантність	19 %
4.	Гра	15 %
5.	Нехтування	10 %
6.	Пасивність	10 %
7.	Соціабельність	5 %

Іншими темами, які найчастіше траплялися в описуваних курсантами ситуаціях були такі:

– домінантність: прагнення впливати на інших людей (проблеми матеріального достатку: бідний – багатий; вплив влади, соціального статусу: господар – слуга; цар – раб; начальник – підлеглий; командир – рядовий; свій – чужий (ворог));

– агресії: прагнення побороти супротивника, завдавши йому шкоди, яка може носити як вербальний характер (принизити словом), так і невербальний (бійка або ж навіть смертельна травма).

Цікавою у цьому контексті видається виявлена тенденція, що може слугувати серйозним аргументом моральної та особистісної дезінтеграції респондентів. Ідеться про оповідання з агресивною тематикою, які завершуються насильницькою або фатальною смертю. Якщо опиратися на теорію З. Фрейда, який розглядає інстинкт смерті («*mortido*») як такий, що може проявлятися у вигляді агресивних потягів, то презентовані сюжети яскраво це підтверджують. Тривожним є й той факт, що «смерть» як кінцеву розв'язку подій курсанти зображають у ракурсі, що засвідчує певні суїцидальні нахили:

«... Степан іде, а цього ніхто навіть не помічає... Покинутий усіма хлопець помирає (фізично чи духовно – байдуже)...»;

«... людина знайшла потерпілого, який помирає, проте немає ніякого бажання йому допомогти через свою байдужість...».

Окрім цього, були обрані й теми, що можуть розглядатися як прояв певних захисних механізмів, або ж як нездатність рефлексувати дійсність, а відтак її проєктувати, про що свідчать багаторазові запитання: «А звідки я можу знати, хто ці люди? Чи що вони відчують?». Домінантними були теми:

– «пристосування»: пасивне підкорення зовнішнім силам, сором'язливість, несміливість;

– «гра»: оптимізм, активність, безтурботність і безвідповідальність.

Ба більше, невіра в можливість контролювати події власного життя, елементи фаталізму виявлялися респондентами у таких висловлюваннях:

«... напевно (можливо), ця ситуація завершиться...»;

«... я навіть не знаю, як завершиться тепер ця ситуація...»;

«... дана ситуація може завершитися так... або так... це вже залежить від багатьох обставин»;

«... як тепер завершиться ця ситуація ніхто не знає...»;

«... тепер усе залежить від долі...».

Репродуктивний матеріал для своєї уяви юнаки беруть не лише з прочитаних книг, бесід із дорослими, а й з того, що особисто спостерігають, переживають, а тому описані курсантами сюжети – це, власне, і є їхнє бачення своєї ситуації сьогодні. На основі вивчення проєктивних тем та оцінки їх за критерієм модальності відносин, можна зробити висновок, що в більшості випадків життєва ситуація респондентів (74 %) визначається деструктивними та пасивними тенденціями.

Кількісний аналіз показав: обрахування статистичної частоти структурних елементів ситуації (ідентифікація героїв у середовищі, оцінка ситуації та героїв у ній, ототожнення

себе з героєм, усвідомлення героєм суперечності (проблемності) певної ситуації, завершення ситуації – відсутність перспективи) та середньоарифметичного значення кожного із зазначених параметрів дозволило припустити, що більшість респондентів, потрапляючи в певні життєві обставини, потенційно не здатні суб'єктно протистояти їм через неусвідомлення змісту колізійних ознак ситуації (81 %) та залежності від даної ситуації (61 %) (табл. 2).

Таблиця 2 – Відсотковий розподіл результатів респондентів за виділеними ознаками колізійної ситуації

<i>Найменування ознак</i>		<i>Значення показника \geq сер. арифм. вибірки</i>
a	Виокремлення героїв із середовища	91 %
b	Оцінка ситуації і героїв у ній	76 %
c	Ідентичність з героєм	14 %
d	Усвідомлення героєм суперечності, колізії даної ситуації	19 %
i	Завершеність ситуації – відсутність перспективи	39 %

Щоб з'ясувати, які саме особистісні фактори можуть впливати на оцінку, розуміння, переживання респондентами колізійної ситуації, було застосовано «Тест смисложиттєвих орієнтацій» – адаптовану версію тесту «Ціль у житті» (Pur pose – in Life Test, PIL) Д. Крамбо і Л. Махолика (адаптація Д. Леонтєєва).

За допомогою даного тесту визначили наступні параметри:

1) «цілі в житті» (бали за цією шкалою характеризують наявність чи відсутність у житті обстежуваних цілей, які надають життю змістовності, спрямованості і часової перспективи);

2) «процес життя або інтерес і емоційна насиченість життя» (цей показник говорить про те, чи сприймає обстежуваний процес свого життя як цікавий, емоційно насичений і наповнений змістом);

3) «результативність життя чи задоволеність самореалізацією» (бали за цією шкалою відображають оцінку пройденого відрізка життя, відчуття того, наскільки продуктивним і змістовним був його прожитий етап).

4 і 5-та шкали виявляють внутрішній локус контролю, зокрема:

4) «локус контролю життя або керованість життя» характеризує загальне переконання в тому, що контроль життя можливий;

5) «локус контролю «Я» (Я – господар життя)» – відображає віру у власну спроможність здійснювати такий контроль.

Використовуючи коефіцієнти до кожного параметра, отримано дані для зіставлення з відповідними показниками норми. Результати аналізу отриманих даних відображено наступним чином у табл. 3.

Таблиця 3 – Відсотковий розподіл показників респондентів за тестом смисложиттєвих орієнтацій

<i>Найменування шкал</i>	<i>Відсотковий розподіл показників</i>	
	<i>Значення показника \geq норми</i>	<i>Значення показника \leq норми</i>
1. «Цілі в житті»	55 %	45 %
2. «Процес життя»	61 %	39 %
3. «Результативність життя»	68 %	32 %
4. «Локус контролю «Я»»	54 %	46 %
5. «Локус контролю життя»	60 %	40 %

Виявилось, що найбільше значення курсанти (68 %) відводять результативності життя, власній самооцінці пройденого етапу життя, його продуктивності, змістовності. Невисокими були показники за шкалами внутрішнього локусу контролю для усієї вибірки досліджуваних, що може співвідноситися з низькими значеннями показників у респондентів за параметром: «завершеність ситуації – відсутність перспективи»

малюнкowego апперцептивного тесту. Невіра у можливість контролювати події власного життя, елементи фаталізму спричиняють залежність від даної ситуації. У результаті, припускаємо, що курсант під тиском обставин може відступити, «віддатися на розсуд долі» тощо.

Застосування методів математичної статистики (кореляційного аналізу) дозволило виявити позитивний лінійний зв'язок ($r = 0,784$ при $p < 0,01$) за результатами малюнкowego апперцептивного тесту і тесту смисложиттєвих орієнтацій (СЖО) з урахуванням усіх можливих градацій їх кількісних показників. Обрахування коефіцієнта детермінації ($d = 0,62$) дозволило припустити, що особливості переживання курсантами можливої (потенційної) колізійної ситуації на 62 % пояснюються характерними смисложиттєвими орієнтаціями, які мають такі параметри: «цілі життя», «процес життя або емоційна насиченість життя», «результативність життя або задоволеність самореалізацією», «внутрішній локус контролю».

Висновки і перспективи. Розвиток стресостійкості в професійній діяльності майбутніх офіцерів морського флоту є гострою і серйозною проблемою. Стрес для особистості моряка може стати тією загрозою, емоційне переживання якої чинитиме вплив на здатність ефективно виконувати свою роботу. Окрім соціальних чинників стресостійкості, обґрунтовано ряд особистісних, серед яких: наявність чітких цілей, задоволеність власним результатом життя, активна суб'єктно-вчинкова позиція, здатність усвідомлювати колізійність проблемної ситуації, рефлексувати дійсність, локус контролю. Видається вельми важливим забезпечити у морських закладах вищої освіти вчасну діагностику, а в подальшому й корекцію психологічних особистісних чинників курсантів, які є вагомими ресурсами стресостійкості і забезпечують конструктивне подолання стресорів професійного середовища.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Броневицкий Г. Психическая устойчивость – залог надежности профессиональной деятельности моряка. *Морской сборник*. 2006. № 4. С. 70–74.
2. Даниленко А. А. Психологические основы управления на морском транспорте : учебник. Санкт-Петербург : Издательство Санкт-Петербургского института истории РАН «НесторИстория», 2004. 395 с.
3. Міжнародна Конвенція про підготовку та дипломування моряків та несення вахти 1978 р. (Конвенція ПДНВ 78/95) з поправками 2010 р.
4. Оніщенко Н. В., Побідаш А. Ю., Тімченко О. В., Христенко В. Є. Психологічні особливості життєвої стійкості моряків – жертв піратського полону : монографія. Харків : НУЦЗУ, 2012. 294 с.
5. Підпала І. В. Сьогодення торговельного флоту України та його вплив на забезпечення прав українських моряків. *Актуальні проблеми права: теорія і практика*. 2016. № 32. С. 269–275.
6. Шафран Л. М., Голікова В. В. Фізіолого-гігієнічні особливості професійної діяльності моряків спеціалізованого флоту. *Український журнал з проблем медицини праці*. 2014. № 3(40). С. 29–39.
7. Mellbye A., Carter T. Seafarers' depression and suicide. *Int. Marit. Health*. 2017. 68 (2). P. 108–114.
8. Roberts S. E., Marlow P. B. Traumatic work related mortality among seafarers 36 employed in British merchant shipping, 1976-2002. *Occup. Environ. Med.* 2005; 62(3). P. 172–180.
9. Jegaden D., Menaheze M., Lucas D., Loddé B., Dewitte J.D. Don't forget about seafarer's boredom. *Int. Marit. Health*. 2019. 70(2). P. 82–87.
10. Oldenburg M., Jensen H.J., Latza U., et al. Seafaring stressors aboard merchant and passenger ships. *Int J Public Health*. 2009; 54(2). P. 96–105.
11. Селье Г. Стресс без дистресса. М., 1992. С. 104–109.

12. Психофизиология: учебник для вузов / под ред. Ю. И. Александрова. СПб, 2006. С. 342 – 343.
13. Психология здоровья / под ред. Г.С. Никифорова. СПб : Питер, 2003. 607 с.
14. Фромм Э. Анатомия человеческой деструктивности. М. : Республика, 1994. 447 с.
15. Нартова-Бочавер С. «Coping behavior» в системе понятий психологии личности. *Психологический журнал*. 1997. Т.18, № 5. С. 21–30.

REFERENCES

1. Bronevtskyi H. (2006). Psykhycheskaia ustoichyvtost – zaloh nadezhnomy profesyonalnoi deiatelnomy moriaka. *Morskoi sbornyk*, 4, 70–74.
2. Danylenko A. A. (2004). *Psykholohycheskye osnovy upravleniya na morskoy transporte* : uchebnyk. Sankt Peterburg : Yzdatelstvo Sankt-Peterburhskoho ynstytuta ystoryy RAN «NestorYstoryia».
3. Mizhnarodna Konventsia pro pidhotovku ta diplomuvannia moriakiv ta nesennia vakhty 1978 r. (Konventsia PDNV 78/95) z popravkamy 2010.
4. Onishchenko N. V., Pobidash A. Yu., Timchenko O. V., Khrystenko V. Ye. (2012). *Psykholohichni osoblyvosti zhyttievoi stiikosti moriakiv – zhertv piratskoho polonu* : monohrafiia. Kharkiv : NUTsZU.
5. Pidpala I. V. (2016). Sohoddennia torhovelnoho floty Ukrainy ta yoho vplyv na zabezpechennia prav ukrainskykh moriakiv. *Aktualni problemy prava: teoriia i praktyka*, 32, 269–275.
6. Shafran L. M., Holikova V. V. (2014). Fiziolohe - hihienichni osoblyvomy profesiinoy diialnomy moriakiv spetsializovanoho flout. *Ukrainskyi zhurnal z problem medytsyny pratsi*, 3 (40), 29–39.
7. Mellbye A., Carter T. (2017). Seafarers depression and suicide. *Int. Marit. Health.*, 68 (2), 108–114.
8. Roberts S. E, Marlow P. B. (2005). Traumatic work related mortality among seafarers 36 employed in British merchant shipping, 1976-2002. *Occup. Environ. Med.*, 62(3), 172–180.
9. Jegaden D., Menaheze M., Lucas D., Loddé B., Dewitte J. D. (2019). Dont forget about seafarers boredom. *Int. Marit. Health.*, 70(2), 82–87.
10. Oldenburg M., Jensen H.J., Latza U., et al. (2009). Seafaring stressors aboard merchant and passenger ships. *Int J Public Health.*, 54(2), 96–105.
11. Sele H. (1992). *Stress bez dystressa*. Moskva.
12. Psykhofyziolohyia: uchebnyk dlia vuzov / pod red. Yu. Y. Aleksandrova. (2006). Sankt Peterburg, 342–343.
13. Psykholohyia zdorovia / pod red. H.S. Nykyforova. (2003). Sankt Peterburg : Pyter.
14. Fromm Э. (1994). *Anatomyia chelovecheskoy destruktyvnomy*. Moskva : Respublyka.
15. Nartova-Bochaver S. (1997). «Coping behavior» v systeme poniatyi psykholohy lychnomy. *Psykholohycheskyi zhurnal*, Vol. 18, 5, 21–30.

Кальба Я. Е. К ПРОБЛЕМЕ СТРЕССОСТОЙКОСТИ БУДУЩИХ МОРСКИХ ОФИЦЕРОВ

Сегодня проблема стрессоустойчивости будущих морских офицеров чрезвычайно актуальна с точки зрения необходимого уровня компетентности, а также с точки зрения вхождения Украины в европейский контекст социально-экономических изменений. Эта проблема не нова и носит междисциплинарный характер. Рассмотрены сущность и значение понятия «стрессоустойчивость» будущих морских офицеров в профессиональной деятельности. Стрессоустойчивость определяется как индивидуальная способность моряка сохранять адекватную работоспособность во время стрессовых воздействий. Доказано, что низкая стрессоустойчивость приводит к эмоциональным расстройствам морских офицеров, снижению физиологической и психической сопротивляемости в экстремальных условиях профессиональной ситуации. Рассмотрены основные социальные и личностные факторы, влияющие на реакцию стрессоров. Раскрыта важность личных ресурсов будущих моряков. Личные ресурсы могут увеличивать или уменьшать стрессовые реакции, влияя на их тип, интенсивность,

продолжительность и повышая психологическую устойчивость в стрессовых ситуациях. Они включают в себя такие компоненты: активное отношение к жизни, четко дифференцированные цели, намерения субъективных действий, способность выбирать, локус контроля, ответственность за собственную жизнь, жизненные стратегии, творчество и т. д. Основная гипотеза эмпирического исследования была доказано, что наибольшее значение курсанты (68 %) придают эффективности собственной жизни, собственной самооценке прошедшего жизненного этапа, его продуктивности, содержанию. Показатели респондентов по шкалам внутреннего локуса контроля были низкими, что может коррелировать с низкими значениями показателей респондентов, в частности по параметру: «полнота ситуации – бесперспективность». Таким образом, неверие в способность управлять событиями собственной жизни, элементы фатализма вызывают зависимость от данной ситуации. По результатам эмпирического исследования сделан вывод об актуальности своевременной диагностики в морских вузах и дальнейшей коррекции психолого-личностных факторов курсантов, которые являются важными ресурсами стрессоустойчивости и обеспечивают необходимый уровень индивидуального психического развития. стойкость в экстремальных профессиональных ситуациях.

Ключевые слова: стресс, стрессоустойчивость, копинг, социальные факторы стрессоустойчивости, факторы личностной стрессоустойчивости, личные ресурсы.

Kalba Ya. Ye. TO THE PROBLEM OF STRESS RESISTANCE OF FUTURE NAVAL OFFICERS

Today, the issue of stress resistance of future naval officers is extremely actual from the view of required level of competence and also from the view of entry of Ukraine into the European context of socio-economics changes. This problem is not new and has an interdisciplinary nature. The essence and meaning of the concept of «stress resistance» of future naval officers has been considered in the professional activities. Stress resistance is defined as the individual ability of a seafarer to keep of adequate working efficiency during stressors. It is proved that the low stress resistance leads to the emotional disorders of naval officers, reduction of physiological and mental resistance in extreme conditions of the professional situation. The main of social and personal factors influencing to the reaction of the stressors are considered here. The importance of personal resources of future sailors is revealed. The personal resources can increase or decrease of stress reactions, influencing their type, intensity, duration and improve the psychological resistance in stressful situations. They include such components: an active attitude to life, clearly differentiated goals, subjective-action intentions, ability to choose, locus of control, responsibility for their own lives, life strategies, creativity, etc. The main hypothesis of the empiric investigation has been proved, according to which the greatest importance of cadets (68%) is given to the effectiveness of their own lives, their own self-esteem of the past stage of life, its productivity, content. The indicators of the respondents on the scales of the internal locus of control were low, which may be correlated with the low values of the indicators of the respondents, in particular on the parameter: «completeness of the situation – lack of prospects.» Thus, disbelief in the ability to control the events of one's own life, elements of fatalism cause dependence on this situation. According to the results of empiric investigation the conclusion has been made about the relevance of timely diagnostics in higher educational institutions of sea, and further correction of psychological personal factors of cadets, which are important resources of stress resistance and provide the necessary level of individual mental resistance in extreme professional situations.

Keywords: stress, stress resistance, coping, social stress resistance factors, personal stress resistance factors, personal resources.

© Кальба Я. Є.

Статтю прийнято
до редакції 22.06.20

МОДЕЛЮВАННЯ РОЗХОДЖЕННЯ СУДЕН У СИСТЕМІ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ СУДНОВОДІЯ

Паламарчук І. В., к.д.п., Херсонська державна морська академія,
e-mail: ihor3107@meta.ua, ORCID: 0000-0001-9161-1592

Метою дослідження є розвиток сучасних концептуальних підходів до побудови систем підтримки прийняття рішень у судноводінні, визначення теоретичних та практичних засад створення таких систем та пріоритетних шляхів їх практичного впровадження. Із аналізу останніх публікацій виявлено, що широке використання нових інформаційних технологій і сучасних технічних засобів судноводіння призводить до збільшення детальності уявлення наявної навігаційної ситуації, але водночас ускладнюється її оцінка та скорочується час, доступний судноводієві для аналізу і розробки потрібного управлінського рішення. З цієї причини розробка систем підтримки прийняття рішень (СППР) судноводія, що застосовує нові змістовні моделі процесу визначення небезпеки для управління судном при виникненні передумов виникнення аварійної ситуації є актуальною задачею сьогодення. Створення таких систем дозволить знизити негативний вплив людського фактору на процеси управління рухом судна. У статті розроблені теоретичні і практичні засади побудови СППР судноводія, що враховують особливості руху суден, процесу взаємодії людини з технічними засобами судноводіння. Запропоновані нові математичні моделі управління процесом розходження суден. Отримані результати є підґрунтям для подальшого підвищення ефективності функціонування ергатичної системи «людина – технічні засоби судноводіння» та всебічного запровадження досягнень сучасних інформаційних технологій у процеси управління судном.

Ключові слова: система підтримки прийняття рішень, судноводіння, розходження суден, людський фактор.

DOI: 10.33815/2313-4763.2020.1.22.045-053

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Зростання кількості перевезень морем призводить до збільшення аварійності суден, що часто викликає техногенні катастрофи. За статистикою, в період з 2010 по 2019 роки нараховувалося 1186 випадків повної втрати суден по всьому світу.

За типами аварій з 2010 по 2019 рр. становили наступне: затоплення – 50,4 %; посадка на мілину – 20,6 %; пожежа/вибух – 9,9 %; зіткнення суден – 6,1 %; втрата керованості – 6,0 %; пошкодження корпусу (незалежне) – 4,1 %; контакт (з причалом/стороннім об'єктом) – 0,6 %; зникнення/викрадення піратами – 0,8 %; різне – 1,5 %. Слід зазначити, що найбільша кількість усіх втрат та аварій падає на вантажні судна.

Отже, згідно з указаною статистикою, можна зробити висновок, що основна кількість аварій у сучасному суднопластві пов'язана з людським фактором і лише близько 20 % чинників пов'язані з технічними відмовами.

Така аналітика призводить до розуміння необхідності покращення стану речей у світовому суднопластві шляхом запровадження новітніх інформаційних технологій у процеси керування судном. Одним з ефективних шляхів вирішення зазначеної проблеми є розробка та запровадження систем підтримки прийняття рішень (СППР) судноводія.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Аналіз існуючих робіт, які присвячені теорії та практиці створення СППР у суднопластві, переконує у необхідності подальшої розробки таких систем та удосконалення існуючих [1–5]. Слід зазначити, що значною перешкодою на шляху вирішення цього питання стає відсутність чітких формальних моделей, які характеризують процеси взаємодії суден при розходженні [6]. Особливо це стосується ситуації невизначеності, зокрема, коли наявні два та більше суден, а умови огляду водної акваторії є недостатніми [7, 8, 9]. Ключовим фактором правильного рішення такої задачі є забезпечення ефективності рішень управління судном, що приймаються судноводієм.

Широке використання нових інформаційних технологій і сучасних технічних засобів судноводіння (ЗАРП, ЕКНІС, АІС, GPS) призводить до збільшення детальності уявлення наявної навігаційної ситуації, але водночас ускладнюється її оцінка, що скорочує час, доступний судноводію для аналізу й розробки потрібного управлінського рішення [10].

З метою подолання негативного впливу людського фактору і запобігання можливим наслідкам людських помилок у судноводінні, необхідно проводити послідовну політику вдосконалення механізмів і пристроїв, створювати в рамках інтелектуальних систем управління системи штучного інтелекту, орієнтовані на вирішення завдань контролю, оцінки ситуації, прийняття рішень і управління окремими судновими об'єктами, системами і пристроями.

З цієї причини розробка СППР судноводія, що застосовує змістовні моделі процесу визначення небезпеки для управління судном при виникненні передумов аварійної ситуації є актуальною задачею сьогодення.

Формулювання мети статті, постановка задачі. Метою статті є розвиток сучасних концептуальних підходів до побудови СППР у судноводінні, визначення теоретичних та практичних засад створення таких систем.

Для досягнення поставленої мети створено математичні моделі управління рухом суден при розходженні, що дозволяє вирішити важливу наукову й практичну задачу у сфері застосування інформаційних технологій у судноводінні – підвищення якості та безпеки управління судном шляхом створення СППР судноводія.

Об'єктом дослідження є математичні моделі управління рухом суден у СППР судноводія, теоретичні та практичні засади побудови СППР судноводія в умовах впливу людського фактору на процеси управління судном.

Предметом дослідження є процес прийняття рішень з управління рухом судна при розходженні. Особливістю прийняття рішень у судноводінні є необхідність формування і прийняття рішень в умовах реального часу та комплексної взаємодії всіх учасників навігаційної ситуації.

Виклад матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. При створенні СППР судноводія виникають труднощі у визначенні моменту настання надмірного зближення, коли необхідні термінові дії. Це відбувається через недостатню точність інструментальних засобів, відсутність методики оцінки небезпеки зіткнення в берегових системах управління рухом суден і юридичної відповідальності за свої рекомендації. Капітан приймає рішення і одноосібно несе відповідальність, залишаючи береговому центру функції координатора і джерела забезпечення інформацією.

Виконувати будь-яким з наявних способів оцірку небезпеки зіткнення оператор берегової радіолокаційної системи (БРЛС) не може через інтенсивність судноплавства, а якщо і виявляє надмірне зближення, то із запізненням. У зазначених випадках існує нагальна потреба в застосуванні СППР судноводія. Ключовим моментом створення таких систем є розробка математичних моделей аналізу і прогнозування руху суден при розходженні. Вирішенню цієї проблеми і присвячена стаття.

Позначимо кількість взаємодіючих суден у зоні відповідальності БРЛС через n . Параметри, виміряні від системи управління рухом суден, будемо позначати з індексом нуль. Судно, визначене оператором БРЛС, і для якого готується інформація, назвемо супроводжуваним. Позначимо відстань між супроводжуваним судном і іншими суднами через $D_{31}(t)$, між системою управління рухом суден (СУРС) і суднами через $D_{30}(t)$. Першою цифрою індексу завжди буде супроводжуване судно, а другою – інші судна або СУРС.

Тоді функцію відстаней між взаємодіючими суднами в часі можна записати як матрицю:

$$D(t) = \begin{vmatrix} 0 & D_{01}(t) & D_{02}(t) & D_{03}(t) & \dots & D_{0n}(t) \\ D_{10}(t) & 0 & D_{12}(t) & D_{13}(t) & \dots & D_{1n}(t) \\ D_{20}(t) & D_{21}(t) & 0 & D_{23}(t) & \dots & D_{2n}(t) \\ D_{30}(t) & D_{31}(t) & D_{32}(t) & 0 & \dots & D_{3n}(t) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & \dots \\ D_{n0}(t) & D_{n1}(t) & D_{n2}(t) & D_{n3}(t) & \dots & 0 \end{vmatrix}. \quad (1)$$

У звичайних умовах більшість суден виявляються на відстані 12–18 миль, а оцінку ситуації і вибір маневру для розходження рекомендується виконувати при зближенні суден на відстань близько 6 миль.

При виконанні досліджень була поставлена задача визначення безпеки зближення суден різними пристроями СУРС залежно від характеру зміни лінії відносного руху ЛВР рухомих об'єктів з урахуванням динаміки параметрів руху як об'єкта можливого зіткнення, так і супроводжуваного судна.

Для виведення співвідношень розглянемо ситуацію зближення двох суден, представлену на рис. 1. Судно A характеризується параметрами: V_n, K_n, D_0 (V_n – швидкість судна A , K_n – курс судна A , D_0 – дистанція до судна B), судно B – параметрами: V_u, K_u, D_0 (V_u – швидкість судна B , K_u – курс судна B , D_0 – дистанція до судна A). K_0 – поточний курс ЛВР цілі, K_1, K_2 – можливі ЛВР цілі, α_c – курсовий кут судна B , $\alpha_{nn}, \alpha_{нк}$ – кути перетину відповідних ЛВРів з курсом судна A по носу і кормі відповідно, а D_0, D_2, D_3 – відстань від судна B до точок перетину його ЛВРів з курсом судна A . D_1 – дистанція до точки перетину курсів, P – різниця курсів.

Якщо $\alpha_c < \alpha_{nn}$, то ЛВР перетинає курс по носі, якщо $\alpha_c > \alpha_{нк}$, то ЛВР перетинає курс по кормі. Аналогічно для суден ліворуч – якщо $\alpha_c < \alpha_{лн}$, то ЛВР перетинає курс по носі, якщо $\alpha_c > \alpha_{лк}$, то ЛВР перетинає курс по кормі.

Дистанції між судном A і точками перетину ЛВРів судна B з курсом судна A залежатимуть від величини кутів $\alpha_{нк}, \alpha_{нн}$, які пов'язані з кутом α_c співвідношенням $\alpha_{нк} + \Delta\alpha_1 = \alpha_c = \alpha_{нн} - \Delta\alpha_2$.

Розглянемо 18 різних ситуацій зближення, які можуть мати місце при розходженні двох суден і вплив зміни кута на небезпеку їх зіткнення.

З аналізу табл. 1 видно, що як для суден праворуч, так і ліворуч маємо однакову ситуацію щодо зміни небезпеки зіткнення, пов'язаної зі зміною курсового кута ЛВР – у разі, якщо ЛВР проходить по носу, небезпека зіткнення зменшується при збільшенні кута ЛВР і збільшується при зменшенні.

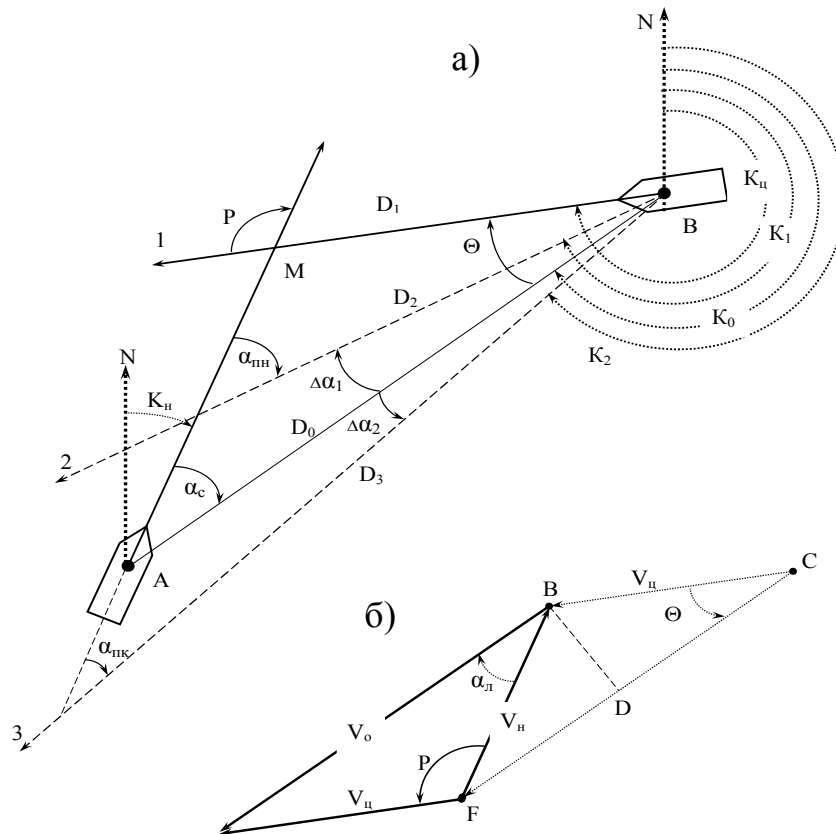


Рисунок 1 – Оцінка ситуації зближення за курсовим кутом ЛВР:
 а) – трикутник позицій; б) – трикутник швидкостей

Таблиця 1 – Залежність небезпеки зіткнення суден від зміни кута ЛВР

Судно	Курсовий кут ЛВР	№ з.п	Характеристика проходження ЛВР	Зміна ЛВР ($+\Delta\alpha$ - α росте) ($-\Delta\alpha$ - α зменш.)	Небезпека зіткнення, її зміна
1	2	3	4	5	6
Праворуч	$\alpha_c < 90^\circ$	1	Перетинає курс по носі	$+\Delta\alpha$	Зменшується
				$-\Delta\alpha$	Збільшується
	$\alpha_c < 90^\circ$	2	Проходить через ніс	$+\Delta\alpha$	Небезпечно
				$-\Delta\alpha$	Небезпечно
	$\alpha_c < 90^\circ$	3	Перетинає курс по кормі	$+\Delta\alpha$	Збільшується
				$-\Delta\alpha$	Зменшується
	$\alpha_c = 90^\circ$	4	Перетинає курс по носі	$+\Delta\alpha$	Зменшується
				$-\Delta\alpha$	Збільшується
	$\alpha_c = 90^\circ$	5	Проходить через ніс	$+\Delta\alpha$	Небезпечно
				$-\Delta\alpha$	Небезпечно
	$\alpha_c = 90^\circ$	6	Перетинає курс по кормі	$+\Delta\alpha$	Збільшується
				$-\Delta\alpha$	Зменшується
	$\alpha_c > 90^\circ$	7	Перетинає курс по носі	$+\Delta\alpha$	Зменшується
				$-\Delta\alpha$	Збільшується

Продовження табл. 1

1	2	3	4	5	6
Праворуч	$\alpha_c > 90^0$	8	Проходить через ніс	$+\Delta\alpha$	Небезпечно
				$-\Delta\alpha$	Небезпечно
	$\alpha_c > 90^0$	9	Перетинає курс по кормі	$+\Delta\alpha$	Збільшується
				$-\Delta\alpha$	Зменшується
Ліворуч	$\alpha_c < 90^0$	10	Перетинає курс по носі	$+\Delta\alpha$	Зменшується
				$-\Delta\alpha$	Збільшується
	$\alpha_c < 90^0$	11	Проходить через ніс	$+\Delta\alpha$	Небезпечно
				$-\Delta\alpha$	Небезпечно
	$\alpha_c < 90^0$	12	Перетинає курс по кормі	$+\Delta\alpha$	Збільшується
				$-\Delta\alpha$	Зменшується
	$\alpha_c = 90^0$	13	Перетинає курс по носі	$+\Delta\alpha$	Зменшується
				$-\Delta\alpha$	Збільшується
	$\alpha_c = 90^0$	14	Проходить через ніс	$+\Delta\alpha$	Небезпечно
				$-\Delta\alpha$	Небезпечно
$\alpha_c = 90^0$	15	Перетинає курс по кормі	$+\Delta\alpha$	Збільшується	
			$-\Delta\alpha$	Зменшується	
	$\alpha_c > 90^0$	16	Перетинає курс по носі	$+\Delta\alpha$	Зменшується
				$-\Delta\alpha$	Збільшується
	$\alpha_c > 90^0$	17	Проходить через ніс	$+\Delta\alpha$	Небезпечно
				$-\Delta\alpha$	Небезпечно
	$\alpha_c > 90^0$	18	Перетинає курс по кормі	$+\Delta\alpha$	Збільшується
				$-\Delta\alpha$	Зменшується

Для випадку, коли ЛВР проходить по кормі, маємо залежність зміни небезпеки зіткнення від курсового кута ЛВР, зворотну з проходженням ЛВР по носі.

Більш точна оцінка зміни небезпеки зіткнення, зумовлена зміною кута ЛВР, вимагає встановлення залежності швидкості зміни кута ЛВР від швидкості зміни кута Θ ($\Theta = K_u - K_0$). Скористаємося рівністю кута α_c в трикутнику позицій з кутом α_d в трикутнику швидкостей.

З векторного трикутника швидкостей кут за допомогою теореми синусів можна визначити як:

$$\frac{V_4}{V_n} = \frac{\sin a_n}{\sin \Theta}, \text{ або } a_n = \arcsin\left(\frac{V_4 \sin \Theta}{V_n}\right). \quad (2)$$

Диференціюючи вираз (2), визначимо швидкість зміни a_d від Θ :

$$d\alpha_d = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{V_u \sin \Theta}{V_n}\right)^2}} \frac{V_u}{V_n} \cos \Theta d\Theta. \quad (3)$$

Спростуючи вираз (3), отримаємо:

$$d\alpha_n = \frac{V_y \cos \Theta d\Theta}{\sqrt{V_n^2 - V_y^2 \sin^2 \Theta}} = \frac{\cos \Theta d\Theta}{\sqrt{\frac{V_n^2}{V_y^2} - \sin^2 \Theta}}. \quad (4)$$

Отже, залежність швидкості зміни α_n (α_c) від швидкості зміни Θ буде визначатися співвідношенням:

$$\Delta\alpha_n = \Delta\alpha_c = \frac{\cos \Theta}{\sqrt{\left(\frac{V_n}{V_y}\right)^2 - \sin^2 \Theta}} \Delta\Theta. \quad (5)$$

З аналізу виразу (3) можемо зробити наступні висновки:

- 1) при $V_n = V_y$ отримуємо $\Delta\alpha_c = \Delta\Theta$, тобто зміна ЛВР в точності відповідає зміні пеленга;
- 2) при $\Theta = 90^\circ$ та $\Theta = 270^\circ$ – маємо небезпечну ситуацію, коли ЛВР проходить через ніс і не змінюється;
- 3) при $\Theta = 0^\circ$ та $\Theta = 180^\circ$, а також близьких до них кутів Θ , $\Delta\alpha_c = \frac{V_y}{V_n} \Delta\Theta$.

Отже, за різницею курсу цілі і відносного курсу визначається величина курсового кута ЛВР, що дає можливість розрахувати $\alpha_{нк}$ та $\alpha_{нн}$ за формулами: $\alpha_{нн} = \alpha_c + \Delta\alpha$, $\alpha_{нк} = \alpha_c - \Delta\alpha$. Беручи до уваги формулу (2), отримуємо остаточний вираз для розрахунку $\alpha_{нк}$ і $\alpha_{нн}$ зі зміни кута Θ :

$$\alpha_{нк} = \arcsin\left(\frac{V_y \sin \Theta}{V_n}\right) - \frac{\cos \Theta}{\sqrt{\left(\frac{V_n}{V_y}\right)^2 - \sin^2 \Theta}} \Delta\Theta, \quad (6)$$

$$\alpha_{нн} = \arcsin\left(\frac{V_y \sin \Theta}{V_n}\right) + \frac{\cos \Theta}{\sqrt{\left(\frac{V_n}{V_y}\right)^2 - \sin^2 \Theta}} \Delta\Theta. \quad (7)$$

Позиційний трикутник дозволяє визначити дистанцію перетину курсу (bow cross range – BCR):

$$BCR = \sqrt{D_0^2 + D_1^2 - 2D_0D_1 \cos \Theta};$$

$$BCR = \sqrt{D_0^2 + D_1^2 + 2D_0D_1 \cos(P + \alpha_c)}. \quad (8)$$

Знову, використовуючи теорему синусів і співвідношення $D_1/\sin \alpha_c = D_0/\sin P$, перетворимо вираз (8) до вигляду:

$$BCR = \sqrt{D_0^2 + D_0^2 \frac{\sin^2 \alpha_c}{\sin^2 P} + 2D_0^2 \frac{\sin \alpha_c}{\sin P} \cos(P + \alpha_c)} = D_0 \sqrt{1 + \frac{\sin^2 \alpha_c}{\sin^2 P} + 2 \frac{\sin \alpha_c}{\sin P} \cos(P + \alpha_c)}. \quad ((9))$$

Тестування запропонованої моделі управління розходженням суден у СППР судноводія здійснювалося в Херсонській державній морській академії із застосуванням комплексу тренажерного обладнання Navi Trainer 5000 виробництва компанії TRANSAS, що підтвердило доцільність її практичного застосування в СППР судноводія.

Висновки і перспектива подальшої роботи в даному напрямі. Оцінка небезпеки зіткнення суден за єдиним інформаційним параметром – зміна напрямку ЛВР, дозволяє підвищити оперативність прийняття рішень судноводієм при виборі маневру розходження. Порівнюючи з традиційними походами, які використовують спостережувані або обчислювані параметри, він дозволяє завчасно визначити небезпеку розвитку ситуації. Запропоновану методику оцінки небезпеки зіткнення за зміною курсового кута ЛВР доцільно використовувати в автоматизованих системах управління рухом суден, берегових СУРС, а також при створенні спеціалізованих СППР судноводія.

Крім того, при використанні інформації від АІС у СУРС цей спосіб дозволяє визначити небезпечне зближення навіть при маневруванні суден, коли в наявних пристроях відбувається скидання супроводу суден-цілей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Maltsev A. S. The ways of Enhancing the safety of Navigation. *Thesis of the third General assembly of IAMU*. Rock port, USA. 2002. Sec. II A. P.16–26.
2. Maltsev A. S. Five steps to assure navigational safety. *Collection of IAMU scientific works*. Dalian : Maritime University Press. 2006. P. 170–179.
3. E. Mitropoulos. E-navigation: a global resource. *Seaways*. The Nautical Institute. March 2007. P. 7–9.
4. Мальцев А. С., Стариков И. М. Психологические аспекты маневра последнего момента. *Судовождение: сб. научн. трудов*. ОНМА. Одесса : «Латстар», 2002. Вып. 4. С. 64–81.
5. Шерстюк В. Г., Бень А. П. Гибридная интеллектуальная СППР для управления судном. *Искусственный интеллект*. 2008. № 3. С. 490–499.
6. Lisowski J. Game control methods in navigator decision support system. *The Archives of Transport*. 2005. No 3-4, Vol. XVII. P. 133–147.
7. Lopez Eloy, Velasc Francisco J., Moyano Emiliano, Rueda Teresa M. Full-scale manoeuvring trials simulation, *Journal of Maritime Research*. 2004. Vol. I. No. 3. P. 37–50.
8. Мальцев А. С., Голиков В. В., Жуков Д. С. Обобщенный критерий оценки согласованности системы управления и характеристик человека-оператора. *Вісник Одеського національного морського університету : зб.наук.праць*. Вип.24. Одеса : ОНМУ, 2008. С.65–75.
9. IMO SUB-committee on safety of navigation. 58th session. Agenda item 6. NAV 58/WP.6/Rev.1. E-Navigation. July 2012.
10. Lisowski J. Mathematical modeling of a safe ship optimal control process. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2005. Vol. 14. P. 68–75.

REFERENCES

1. Maltsev A. S. (2002). The ways of Enhancing the safety of Navigation. *Thesis of the third General assembly of IAMU*. Rock port, USA, 2002. Sec. II A, 16-26.
2. Maltsev A. S. (2006). Five steps to assure navigational safety. *Collection of IAMU scientific works*. Dalian : Maritime University Press, 170-179.

3. Mitropoulos E. (2007). E-navigation: a global resource. *Seaways*. The Nautical Institute. 7–9.
4. Mal'cev A. S. & Starikov I. M. (2002). Psihologicheskie aspekty manevra poslednego momenta. *Sudovozhdenie: sb. nauchn. Trudov*, 4, 64–81.
5. Sherstyuk V. G., Ben' A. P. (2008). Gibridnaya intellektual'naya SPPR dlya upravleniya sudnom. *Iskusstvennyy intellekt*, Vol. 3, 490–499.
6. Lisowski J. (2005). Game control methods in navigator decision support system. *The Archives of Transport*, 3–4, Vol. XVII, 133–147.
7. Lopez Eloy, Velasc Francisco J., Moyano Emiliano, Rueda Teresa M. (2004). Full-scale manoeuvring trials simulation. *Journal of Maritime Research*, Vol. I. No. 3, 37–50.
8. Mal'cev A. S. Golikov V. V. & Zhukov D. S. (2008). Obobshchennyj kriterij ocenki soglasovannosti sistemy upravleniya i harakteristik cheloveka-operatora. *Visnik Odes'kogo nacional'nogo mors'kogo universitetu : zb.nauk.prac'*. Vol.24. Odesa: ONMU. 65–75.
9. IMO SUB-COMMITTEE ON SAFETY OF NAVIGATION. 58th session. Agenda item 6. NAV 58/WP.6/Rev.1. E-NAVIGATION. July 2012.
10. Lisowski J. (2005). Mathematical modeling of a safe ship optimal control process. *Polish Journal of Environmental Studies*, Vol. 14. 68–75.

Паламарчук И. В. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСХОЖДЕНИЯ СУДОВ В СИСТЕМЕ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ СУДОВОДИТЕЛЯ

Целью исследования является развитие современных концептуальных подходов к построению систем поддержки принятия решений в судовождении, определение теоретических и практических основ создания таких систем и приоритетных путей их практического внедрения. Из анализа последних публикаций выявлено, что широкое использование новых информационных технологий и современных технических средств судовождения приводит к увеличению детальности представления имеющейся навигационной ситуации, но одновременно усложняется её оценка и сокращается время, доступное судоводителю для анализа и разработки нужного управленческого решения. По этой причине разработка систем поддержки принятия решений (СППР) судоводителя, которые используют новые содержательные модели процесса определения опасности для управления судном при возникновении предпосылок возникновения аварийной ситуации, является актуальной задачей настоящего времени. Создание таких систем позволит снизить негативное влияние человеческого фактора на процессы управления движением судна. В статье разработаны теоретические и практические основы построения СППР судоводителя, учитывающие особенности движения судов, процесса взаимодействия человека с техническими средствами судовождения. Предложены новые математические модели управления процессом расхождения судов. Осуществлена классификация судов по степени опасности в зависимости от изменения угла линии их относительного движения. Представлены критерии количественной оценки уровня опасности судна на основе анализа изменения угла линии его относительного движения. Полученные результаты являются основой для дальнейшего повышения эффективности функционирования эргатической системы «человек – технические средства судовождения» и всестороннего внедрения достижений современных информационных технологий в процессы управления судном.

Ключевые слова: система поддержки принятия решений, судовождение, расхождение судов, человеческий фактор.

Palamarchuk I. V. MODELING THE DIVERGENCE OF SHIPS IN THE DECISION SUPPORT SYSTEM OF THE NAVIGATOR

The aim of the study is to develop modern conceptual approaches to the construction of decision support systems in navigation, to determine the theoretical and practical foundations for creating such systems and priority ways of their practical implementation. From the analysis of recent publications, it has been revealed that the widespread use of new information technologies and modern technical means of navigation leads to an increase in the detail of the present navigation situation, but at the same time its assessment becomes more complicated and the time available to the navigator for analysis and development of the necessary control decision is reduced. For this reason, the development of decision support systems (DSS) for the navigator, which use new meaningful models of the hazard identification process for navigating a ship in the event of prerequisites for an emergency, is an urgent task of the present time. The creation of such systems will reduce the negative impact of the human factor on the processes of ship traffic control. The article

develops theoretical and practical foundations for constructing a DSS for a navigator, taking into account the peculiarities of the movement of ships, the process of human interaction with technical means of navigation. The article develops theoretical and practical foundations for constructing a DSS for a navigator, taking into account the peculiarities of the movement of ships, the process of human interaction with technical means of navigation. New mathematical models of control over the process of divergence of ships are proposed. The classification of ships according to the degree of danger is carried out, depending on the change in the angle of the line of their relative movement. Criteria for a quantitative assessment of the hazard level of a ships based on the analysis of changes in the angle of the line of its relative motion are presented. The results obtained are the basis for further increasing the efficiency of the functioning of the ergatic system «man - technical means of navigation» and the comprehensive implementation of the achievements of new information technologies in the ship control processes.

Keywords: *decision support system, navigation, divergence of ships, human factor.*

© Паламарчук І. В.

Статтю прийнято
до редакції 18.05.20

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СПОСОБЫ РАСХОЖДЕНИЯ СУДОВ И АНАЛИЗ ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Хуссейн Ю. М., аспирант Национального университета «Одесская морская академия»;
Янчецкий А. В., аспирант Национального университета «Одесская морская академия»

Статья посвящена анализу наиболее перспективных и эффективных локально-независимых способов расхождения судов для формирования системы автоматического предупреждения столкновений, обеспечивающую безопасность перспективных автономных судов.

Рассмотрены этапы процесса принятия решения по необходимости расхождения судов при их сближении и выборе стратегии расхождения. Приведены аналитические выражения для формализации предложенных этапов процесса принятия решения по необходимости расхождения судов. В качестве показателя эффективности аналитических систем предупреждения столкновений судов предложена вероятность безопасного завершения процесса расхождения, которая является произведением вероятностей успешного исхода этапов процесса принятия решения по выбору стратегии расхождения.

Для системы автоматического предупреждения столкновений предложены методы расхождения с одной опасной целью изменением курса или скорости судна и с двумя опасными целями комбинированным маневром повторного изменения курса судна.

Ключевые слова: безопасность судоходства, процесс расхождения судов, локально-независимое управление, область недопустимых параметров.

DOI: 10.33815/2313-4763.2020.1.22.054-063

Постановка проблемы. Снижение аварийности судов из-за их столкновений при плавании в стесненных водах является актуальной проблемой. Основным принципом управления процессом расхождения судов при их опасном сближении является локально-независимое управление, при котором каждое из судов контролирует текущую ситуацию сближения.

Интенсивные исследования по созданию автономных судов, которые проводятся в настоящее время, для их безопасного плавания требуют разработки системы автоматического предупреждения столкновений судов, использующей принцип локально-независимого управления. Для функционирования такой системы следует произвести выбор наиболее эффективных способов расхождения судна с целью изменения курса или скорости. Так как сейчас разработаны различные аналитические системы предупреждения столкновений судов, то необходимо разработать способ сравнительного анализа их эффективности. Также требуется использование комбинированных методов расхождения судна с двумя опасными целями. Анализ наиболее перспективных и эффективных способов расхождения судов для формирования системы автоматического предупреждения столкновений является актуальным научным направлением, чем и обусловлена тематика статьи.

Анализ последних достижений и публикаций. В работе [1] рассмотрены взаимодействия судов при опасном сближении и выбор стратегии расхождения для предупреждения их столкновения, а в работе [2] приведено подробное исследование методов локально-независимого управления, причем для расхождения оперирующего судна с несколькими опасными целями предложен метод формирования гибких стратегий расхождения. Выбор оптимального стандартного маневра расхождения пары судов рассмотрен в работе [3], а в работе [4] рассмотрены принципы локально-независимого и внешнего управления процессом расхождения опасно сближающихся судов. В работе [5] предложена экстренная стратегия расхождения в ситуации чрезмерного сближения судов, а в работах [6,7] освещены вопросы учета навигационных опасностей и инерционности судна при выборе стратегии расхождения судна.

Работа [8] посвящена автономной судовой системе уклонения от столкновения, в которой рассматриваются требования к автономной навигации и указывается, что исследования по автоматизации управления судном могут быть представлены

в классической или компьютерной категориях. При теоретическом направлении работа не содержит рекомендаций практическому судовождению.

В работе [9] предложено описание процесса расхождения судов в терминах дифференциальной антагонистической игры.

В работе [10] рассмотрено управление тремя судами для безопасного расхождения, а результаты исследования эффективности парных маневров расхождения приведены в работе [11]. Ряд особенностей задачи расхождения судов в море освещен в монографии [12], в которой приведен метод предупреждения столкновения судов путем смещения на параллельную линию пути.

Цель статьи. Целью настоящей статьи является анализ наиболее перспективных и эффективных локально-независимых способов расхождения судов для формирования системы автоматического предупреждения столкновений.

Изложение основного материала. Для реализации поставленной в статье цели, прежде всего, следует разработать метод оценки их эффективности, который должен характеризовать степень безопасности завершения процесса расхождения судов, начиная с момента обнаружения ситуации опасного сближения.

В работах [1, 4] предложены к использованию различные аналитические системы предупреждения столкновений судов при локально-независимом управлении их процессом расхождения, для сравнительного анализа которых следует рассмотреть составляющие процесса принятия решения по необходимости расхождения судов при их сближении и, в случае ее наличия, выбору стратегии расхождения. Процесс принятия решения содержит следующие этапы:

- Контроль за окружающей обстановкой, включая относительную позицию и параметры относительного движения;
- выявление ситуации сближения судов;
- при сближении судов следует произвести оценку степени его опасности;
- в зависимости от степени опасности ситуации сближения выбор стратегии расхождения.

На первом этапе процесса принятия решения с помощью САРП или АИС выявляются окружающие подвижные объекты, для которых измеряются параметры движения и относительного положения. На этом этапе определяются относительный курс K_{ot} и скорость V_{ot} с помощью выражений:

$$K_{ot} = \arcsin[(V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2)/V_{ot}];$$

$$V_{ot} = [V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos(K_1 - K_2)]^{1/2},$$

где K_1 , V_1 , K_2 и V_2 – параметры движения судов.

На втором этапе процесса принятия решения, используя измеренные параметры, необходимо рассчитать значение скорости изменения дистанции между судами \dot{D} , учитывая, что при ее отрицательном значении суда сближаются. Значение скорости изменения дистанции между судами рассчитывается с помощью выражения:

$$\dot{D} = -V_{ot} \cos(\alpha - K_{ot}),$$

где α – пеленг с одного судна на другое судно.

На третьем этапе процесса принятия решения при сближении судов производится оценка степени его опасности, для чего прогнозируется развитие ситуации сближения до момента времени их кратчайшего сближения, которое характеризуется дистанцией D_{min} :

$$D_{min} = |D \sin(\alpha - K_{ot})|,$$

где D – дистанция между судами.

Степень опасности сближения судов характеризуется ситуационным возмущением ω , которое возникает при прогнозируемом попадании судов в домен недопустимых

позицій. Оно возникает тогда, когда прогнозируемое значение дистанции кратчайшего сближения D_{\min} меньше значения предельно-допустимой дистанции сближения D_d , величина которой зависит от формы домена недопустимых позиций и ракурса сближения судов. При опасном сближении ситуационное возмущение ω может принимать значения 1 или 2.

Поэтому на четвертом этапе принятия решения в зависимости от степени опасности ситуации сближения, т. е. значения ситуационного возмущения $\omega > 0$, следует выбрать стратегию расхождения, исходя из координации маневров сближающихся судов, предусмотренной МППСС-72. Характер маневра расхождения также определяется значением ситуационного возмущения. В случае $\omega = 1$ предусмотрено применение стандартного маневра расхождения, а при значении $\omega = 2$, что характерно для чрезмерного сближения судов, во избежание столкновения следует использовать маневр экстренного расхождения.

Принципиально важным является число опасно сближающихся судов. В случае, когда опасно сближаются более двух судов, стратегия расхождения формируется с учетом матрицы ситуационного возмущения, которая в качестве элемента содержит значение ситуационного возмущения соответствующей пары судов.

В качестве показателя эффективности аналитических систем предупреждения столкновений судов целесообразно предложить вероятность безопасного завершения процесса расхождения P_s , которая является произведением вероятностей P_i успешного исхода этапов процесса принятия решения по выбору стратегии расхождения:

$$P_s = P_1 P_2 P_3 P_4.$$

В настоящее время проводятся интенсивные исследования по созданию автономных судов, для безопасного плавания которых необходима разработка системы автоматического предупреждения столкновений судов. Для функционирования такой системы следует произвести выбор способов расхождения судна с целью изменения курса или скорости. Также требуется использование комбинированных методов расхождения судна с двумя опасными целями.

Для системы автоматического предупреждения столкновений необходимо рассмотреть методы расхождения следующих типов:

- с одной опасной целью изменением курса судна;
- с одной опасной целью изменением скорости судна;
- с одной опасной целью изменением курса и скорости судна;
- с двумя опасными целями комбинированным маневром повторного изменения курса.

Проведя предварительный анализ, были предложены перспективные, наиболее эффективные способы упомянутых типов маневров расхождения.

В работе [4] указывается, что для предупреждения столкновения судов используется стандартный маневр расхождения изменением курса, который содержит два участка: участок уклонения с программной траектории движения, который характеризуется курсом уклонения K_y и моментом времени начала уклонения t_y , а также участок выхода на заданную (программную) траекторию движения с параметрами K_b – курсом выхода и t_b – моментом поворота на курс выхода. Заключительной характеристикой маневра расхождения является время t_k и курс K_k поворота судна с участка выхода на программную траекторию и конечный программный курс.

В работе [13] для оперативного выбора параметров маневра расхождения судна с целью предложены области недопустимых значений параметров уклонения Q_{K,t_y} и области Q_{K,t_b} допустимых значений параметров уклонения и выхода, которые показаны на рис. 1.

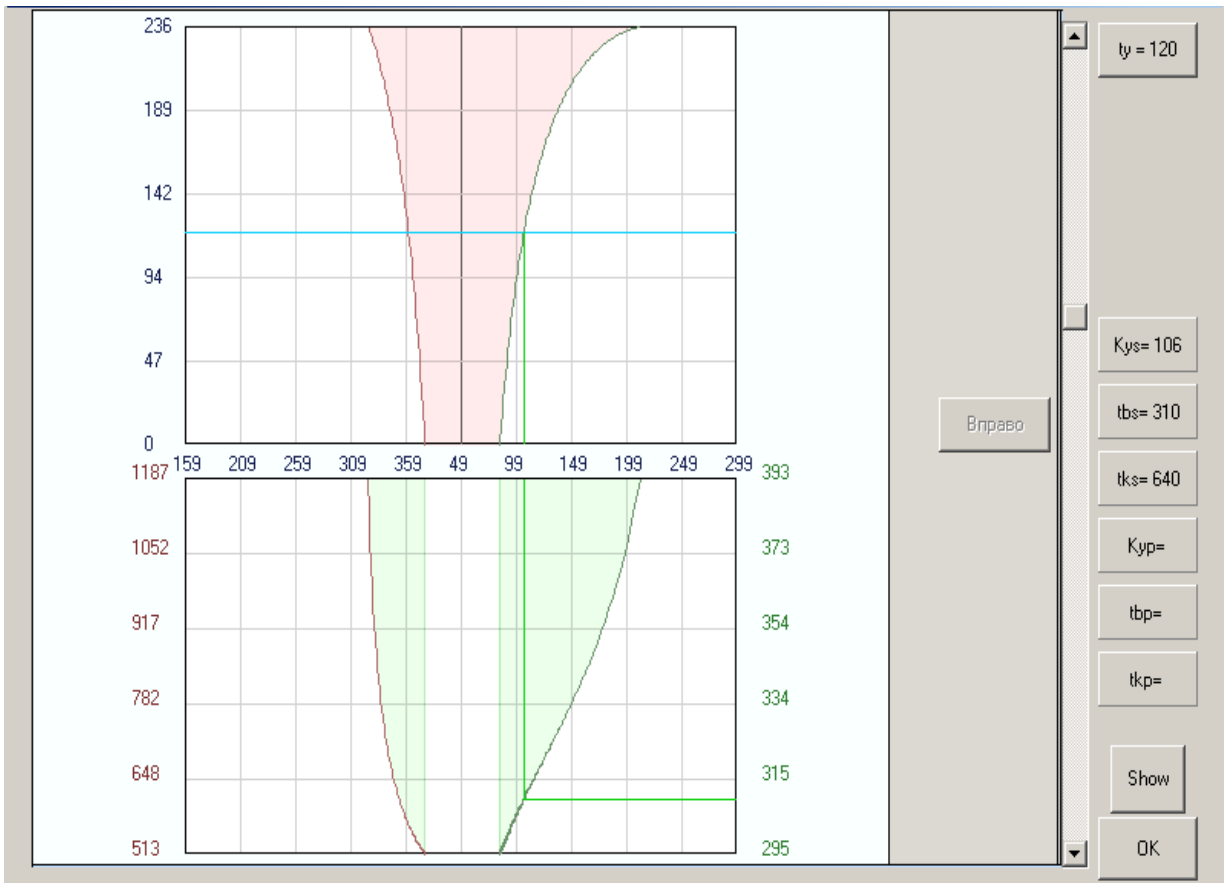


Рисунок 1 – Выбор параметров маневра расхождения

Значение курса уклонения на рис. 1 индицируется вертикальной линией на обеих областях и выводится на информационное табло. В приводимом примере $t_y = 120$ с $K_y = 106^\circ$. Одновременно с изменением t_y на нижней области горизонтальной линией индицируется значение t_b и его значение выводится на панель, в данном примере $t_b = 310$ с. Программой также рассчитывается значение времени t_k достижения судном программной траектории движения и выводится на панель (для примера $t_k = 640$ с).

Для случая выбора маневра расхождения судна снижением скорости активным или пассивным торможением в работе [14] предложен метод формирования области Θ_{dV} и расчета ее границ, для чего была разработана компьютерная программа.

Опасная область Θ_{dV} для активного торможения показана на рис. 2, из которого следует, что при неизменном начальном курсе судна $K_1 = 140^\circ$ безопасное расхождение с целью возможно при снижении скорости активным торможением до величины 0,4 узла, т. е. практически остановкой судна.

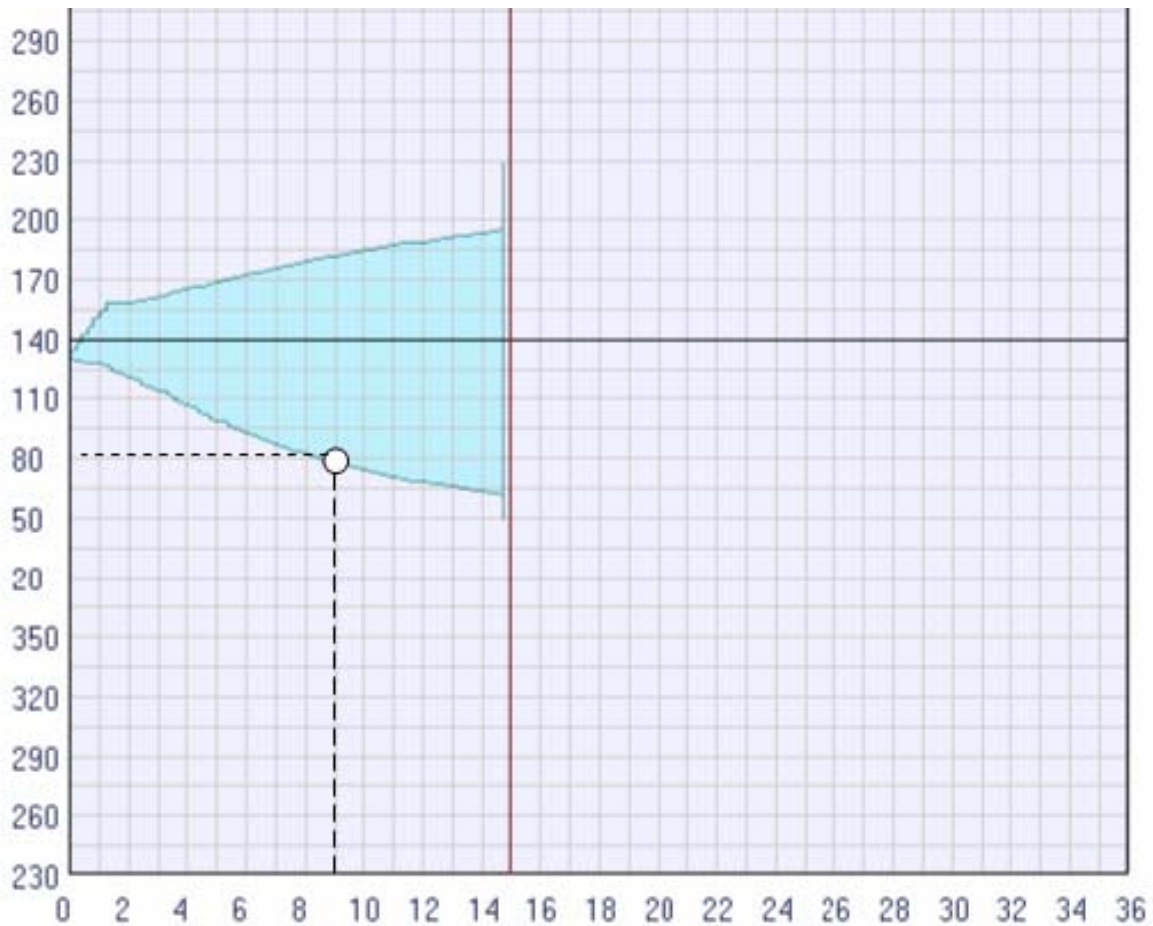


Рисунок 2 – Опасная область Θ_{dV} при активном торможении судна

В случае необходимости расхождения судна с целью изменением курса и скорости можно также применить область Θ_{dV} , на границе которой выбирается точка, соответствующая выбранному курсу и на оси скоростей получим соответствующую скорость. В качестве примера на рис. 2 выбран курс 80° , которому соответствует скорость 9 узлов, полученная активным торможением.

В ситуации опасного сближения судна с двумя целями для оперативного выбора параметров маневра расхождения судна в работе [15] предложено сформировать область допустимых значений последовательных курсов уклонения ∇_{K_1, K_2} .

Граница этой области рассчитывается для курсов первого уклонения в пределах от $K_c \pm 5$ до $K_c \pm 90$. По условию минимального отклонения от программной траектории движения судна второй курс уклонения выбирается в пределах от $K_c \mp 30$ до $K_c \mp 5$, следовательно, $K_{y2} \in [K_c \mp 30, K_c \mp 5]$.

Компьютерной программой была рассчитана граница области ∇_{K_1, K_2} , которая показана на рис. 3.

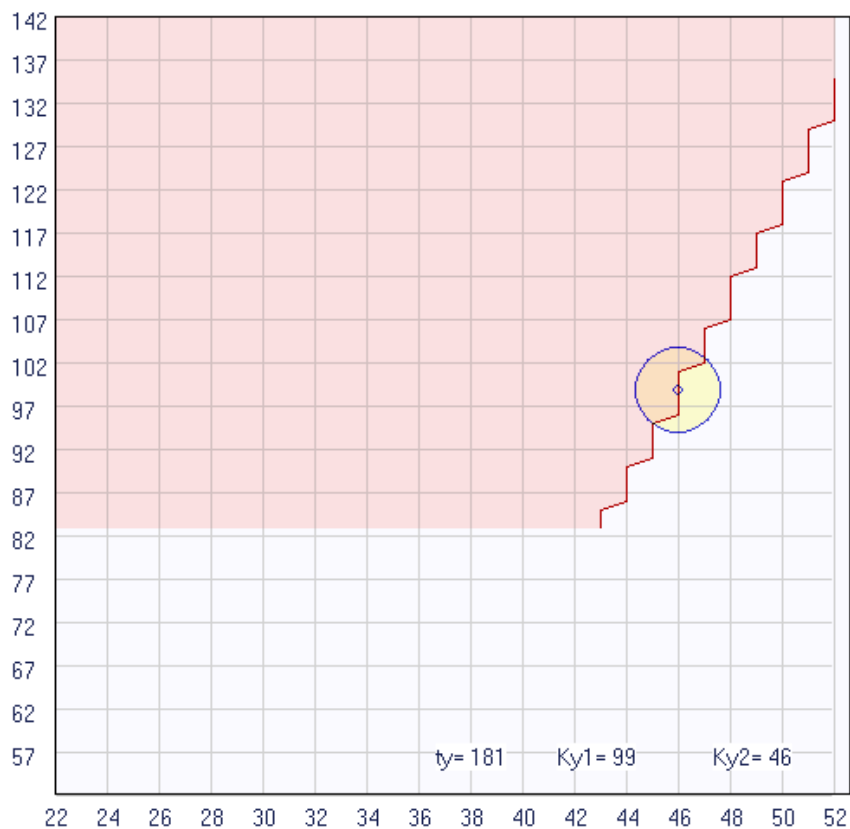


Рисунок 3 – Выбор произвольной точки границы области $V_{K1,K2}$

Если на границе выбрать произвольную точку, как показано на рис. 3, и «кликнуть» ее, то программой выводятся значения курсов и время поворота. Относительные траектории расхождения судна с каждой из целей показаны на рис. 4.

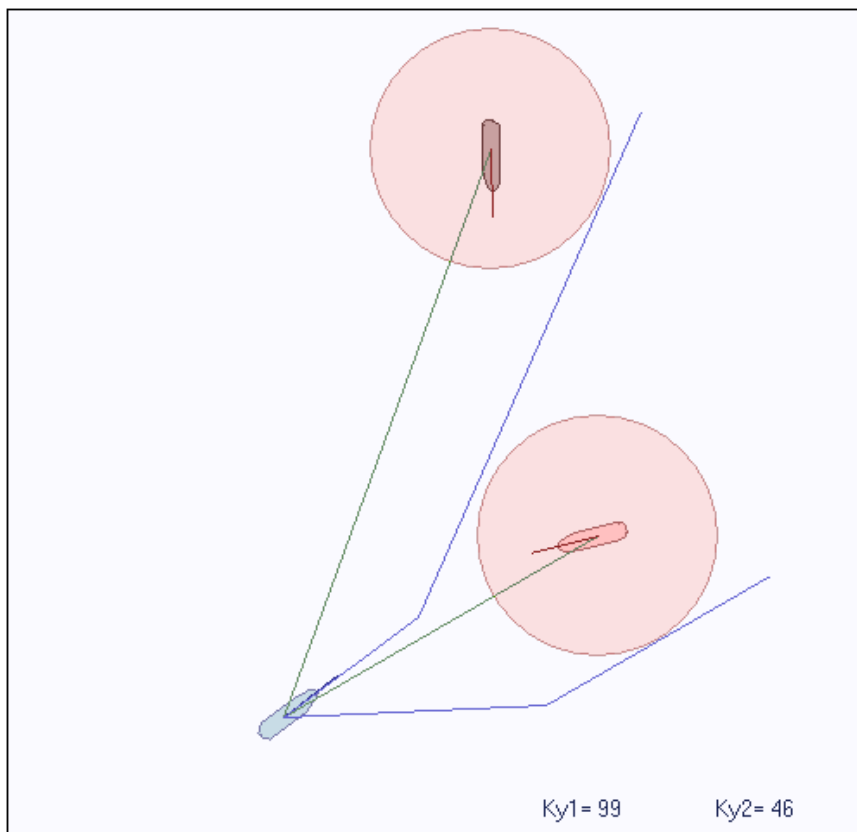


Рисунок 4 – Относительные траектории расхождения судна

Выводы

1. Рассмотрен процесс принятия решения по выбору стратегии расхождения судов и описаны его четыре этапа, а также предложен показатель оценки эффективности аналитических систем предупреждения столкновений судов, который позволяет произвести их сравнительную характеристику.

2. Предложены наиболее приемлемые эффективные способы расхождения судов для локально-независимого управления, которые целесообразно использовать в системе автоматического предупреждения столкновений автономных судов.

3. Представлены примеры применения рассмотренных способов расхождения судов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пятаков Э. Н., Бужбецкий Р. Ю., Бурмака И. А., Булгаков А. Ю. Взаимодействие судов при расхождении для предупреждения столкновения. Херсон : Гринь Д.С., 2015. 312 с.

2. Цымбал Н. Н., Бурмака И. А., Тюпиков Е. Е. Гибкие стратегии расхождения судов. Одесса : КП ОГТ, 2007. 424 с.

3. Сафин И. В. Выбор оптимального маневра расхождения. *Автоматизация судовых технических средств*. 2002. № 7. С. 115–120.

4. Бурмака И. А., Пятаков Э. Н., Булгаков А. Ю. Управление судами в ситуации опасного сближения. Саарбрюккен (Германия) : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. 585 с.

5. Бурмака И. А., Бурмака А. И., Бужбецкий Р. Ю. Экстренная стратегия расхождения при чрезмерном сближении судов. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 202 с.

6. Петриченко Е. А. Вывод условия существования множества допустимых маневров расхождения с учетом навигационных опасностей. *Судовождение*. 2003. №6. С. 103–107.

7. Бурмака И. А. Результаты имитационного моделирования процесса расхождения судов с учетом их динамики. *Судовождение*. 2005. № 10. С. 21–25.

8. Statheros Thomas, Howells Gareth, McDonald-Maier Klaus. Autonomous ship collision avoidance navigation concepts, technologies and techniques. *J. Navig.* 2008. 61, № 1. P. 129–142.

9. Lisowski J. Game and computational intelligence decision making algorithms for avoiding collision at sea. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Technologies for Homeland Security and Safety*. Gdańsk, 2005. P. 71–78.

10. Бурмака И. А., Булгаков А. Ю. Маневр расхождения трех судов изменением курсов. *Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб.* Одесса : ОНМА, 2014. Вып. 20. С. 18–23.

11. Пятаков Э. Н., Заичко С. И. Оценка эффективности парных стратегий расходящихся судов. *Судовождение: сб. научн. трудов*. Одесса : «ИздатИнформ», 2008. Вып.15. С. 166–171.

12. Вагущенко Л. Л. Расхождение с судами смещением на параллельную линию пути. Одесса : Фенікс, 2013. 180 с.

13. Петриченко О. А. Оперативный способ определения параметров маневра расхождения судна. *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*. VI(22), Issue: 186, 2018. С. 68–71.

14. Волков Е. Л. Использование областей недопустимых значений параметров движения судна при локально-независимом управлении процессом расхождения. *East European Science Journal*. 2017. № 11 (27), Part 1. P. 14–24.

15. Пятаков Э. Н., Пятаков В. Э., Омельченко Т. Ю. Способ определения безопасного маневра расхождения судна изменением курса в ситуации опасного сближения с двумя

целями. *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*, 2018. VI(18), Issue: 158. С. 72–76.

REFERENCES

1. Pyatakov E., Pyatakov E., Buzhbetskiy R., Burmaka I., Bulgakov A. (2015). *Cooperation of vessels at divergence for warning of collision*. Kherson : Grin D.S.
2. Tsymbal N., Burmaka I., Tyupikov E. (2007). *Flexible strategies of divergence of vessels*. Odessa : KP OGT
3. Safin I. V. (2007). Choice of optimum maneuver of divergence. *Avtomatizatsiya sudovykh tekhnicheskikh sredstv*, 7, 115–120.
4. Burmaka I., Pyatakov E., Bulgakov A. (2016). *Management by vessels in the situation of dangerous rapprochement*. LAP LAMBERT Academic Publishing, Germany, Saarbrücken.
5. Burmaka I., Burmaka A., Buzhbetskiy R. (2014). *Urgent strategy of divergence at excessive rapprochement of vessels*. LAP LAMBERT Academic Publishing.
6. Petrichenko E. A. (2003). Conclusion of condition of existence of great number of possible manoeuvres of divergence taking into account navigation dangers. *Sudovozhdenie*, 6, 103–107.
7. Burmaka Y.A. (2005). Results of imitation design of process of divergence of vessels taking into account their dynamics. *Sudovozhdenye: sb. nauchn. trudov*, 10, 21–25.
8. Statheros Thomas, Howells Gareth, McDonald-Maier Klaus. (2008). Autonomous ship collision avoidance navigation concepts, technologies and techniques. *J. Navig*, 61, № 1, 129–142.
9. Lisowski J. (2005). Game and computational intelligence decision making algorithms for avoiding collision at sea. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Technologies for Homeland Security and Safety*. Gdańsk. 71–78.
10. Burmaka I. A., Bulgakov A. Y. (2014). Maneuver of divergence of three vessels by the change of courses. *Avtomatizatsiya sudovykh tekhnicheskikh sredstv*, 20, 18–23.
11. Pyatakov E. N., Zaichko S. I. (2008). Estimation of efficiency of pair strategies of going away vessels. *Sudovozhdenie*, 15, 166–171.
12. Vagushchenko L. L. (2013). *Divergence with vessels by displacement on the parallel line of way*. Odessa : Feniks.
13. Petrichenko O. A. (2018). Operative method of determination of parameters of manoeuvre of divergence of ship. *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*, VI (22), Issue: 186, 68–71.
14. Volkov E. L. (2017). Use of regions of impermissible values of parameters of motion of ship at the locally-independent process control of divergence. *East European Science Journal*, 11 (27), part 1, 14–24.
15. Pyatakov E. N., Pyatakov V. E., Omelchenko T. Yu. (2018). Method of determination of safe manoeuvre of divergence of ship by the change of course in the situation of dangerous rapprochement with two целями. *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*, VI(18), Issue: 158, 72–76.

Хуссейн Ю. М., Янчецький О. В. ПЕРСПЕКТИВНІ СПОСОБИ РОЗХОДЖЕННЯ СУДЕН І АНАЛІЗ ЇХ ЕФЕКТИВНОСТІ

Стаття присвячена аналізу перспективних і найбільш ефективних локально-незалежних способів розходження суден для формування системи автоматичного попередження зіткнень, що забезпечує безпеку перспективних автономних суден.

Запропоновано розробку методу оцінки ефективності способів розходження суден, який характеризує ступінь безпеки завершення процесу розходження суден, починаючи з моменту виявлення ситуації небезпечного зближення.

Розглянуто етапи процесу прийняття рішення з потреби розходження суден при їх зближенні і вибору стратегії розходження. Показано, що процес прийняття рішення має наступні етапи: контроль навколишнього оточення, включаючи відносну позицію і параметри відносного руху, виявлення ситуації зближення суден, оцінка ступеня небезпеки зближення і вибір стратегії розходження.

Наведено аналітичні вирази для формалізації запропонованих етапів процесу прийняття рішення з потреби розходження суден.

Показано, що залежно від ступеня небезпеки ситуації зближення, слід вибрати стратегію розходження, виходячи з координації маневрів суден, що зближуються, яка передбачена МППЗС-72.

Причому характер маневру розходження також визначається значенням ситуативного збурення. Зазвичай, передбачено застосування стандартного маневру розходження, а в ситуації надмірного зближення суден, щоб уникнути зіткнення, слід використовувати маневр екстреного розходження.

Як показник ефективності аналітичних систем попередження зіткнень суден запропоновано вірогідність безпечно завершення процесу розходження, яка є добутком вірогідності успішного результату етапів процесу прийняття рішення по вибору стратегії розходження.

Для системи автоматичного попередження зіткнень запропоновано методи розходження з однією небезпечною ціллю зміною курсу або швидкості судна і з двома небезпечними цілями комбінованим маневром повторної зміни курсу судна.

Після попереднього аналізу були запропоновані перспективні найефективніші способи згаданих типів маневрів розходження.

Для оперативного вибору параметрів маневру розходження судна з ціллю запропоновано області неприпустимих значень параметрів ухилення і області допустимих значень параметрів ухилення і виходу. Для випадку вибору маневру розходження судна зниженням швидкості активним або пасивним гальмуванням запропоновано метод формування області неприпустимих швидкостей і розрахунку її меж.

У ситуації небезпечного зближення судна з двома цілями для оперативного вибору параметрів маневру розходження судна в роботі запропоновано сформуванню області допустимих значень послідовних курсів ухилення.

Ключові слова: безпека судноводіння, процес розходження суден, локально незалежне управління, області неприпустимих параметрів.

Khussein Yu. M., Yanchetsky O. V. PERSPECTIVE METHODS OF DIVERGENCE OF VESSELS AND ANALYSIS OF THEIR EFFICIENCY

The article is devoted to the analysis of the most perspective and effective locally-independent methods of divergence of vessels for forming of the system of the automatic warning of collisions, providing safety of perspective autonomous vessels.

Development of method of estimation of efficiency of methods of divergence of vessels, which characterizes the degree of safety of completion of process of divergence of vessels, is offered, since the moment of discovery of situation of dangerous rapprochement.

The stages of process of decision-making divergence of vessels of necessity are considered at their rapprochement and choice of strategy of divergence. It is shown that a decision-making process contains the following stages: control of environment, including relative position and parameters of relative motion, exposure of situation of rapprochement of vessels, estimation of degree of danger of rapprochement and choice of strategy of divergence.

Analytical expressions for formalization of the offered stages of process of decision-making divergence of vessels of necessity are resulted.

It is shown that depending on the degree of danger of situation of rapprochement, it is necessary to choose strategy of divergence, coming co-ordination of maneuvers of the drawn together vessels from, foreseen ColReg. Thus character of maneuver of divergence is also determined by the value of situation indignation. As a rule, application of standard maneuver of divergence is foreseen, and in the situation of excessive

rapprochement of vessels, in order to avoid the collision it is necessary to use the maneuver of urgent divergence.

As the index of efficiency of the analytical collision avoidance systems vessels probability of safe completion of process of divergence, which is work of probabilities of successful finish of stages of process of decision-making on the choice of strategy of divergence, is offered.

For the system of the automatic warning of collisions the methods of divergence with one dangerous target are offered by the change of course or speed of ship and with two dangerous targets by the combined maneuver of the repeated change of course of ship.

After the preliminary analysis the perspective most effective methods of the mentioned types of maneuvers of divergence were offered.

For the operative choice of parameters of maneuver of divergence of ship with a target the regions of impermissible values of parameters of deviation and region of acceptability parameters of deviation and output are offered.

For the case of choice of maneuver of divergence of ship by the decline of speed the active or passive braking offers the method of forming of region of impermissible speeds and calculation of its scopes.

In the situation of dangerous rapprochement of ship with two targets for the operative choice of parameters of maneuver of divergence of ship in work it is suggested to form the region of acceptability successive courses of deviation.

Keywords: *safety of navigation, process of divergence of vessels, locally-independent management, region of impermissible parameters.*

© Хуссейн Ю. М., Янчецький О. В.

Статтю прийнято
до редакції 16.06.20

УДК 628.12.001

ФОРМИРОВАНИЕ ПЛАНА ЗАГРУЗКИ КОНТЕЙНЕРОВОЗА**Цымбал М. Н.,** аспирант Национального университета «Одесская морская академия», ORCID: 0000-0002-7372-7134

В работе рассмотрены вопросы размещения контейнеров при загрузке судна с учетом последовательности портов выгрузки для обеспечения доступа к необходимым партиям, а также то обстоятельство, что промежуточные состояния загрузки судна при переходе между портами должны отвечать требованиям его мореходной безопасности, а возникающие силы инерции находятся в допустимых пределах.

Приведены выражения для расчета приращений статических моментов относительно осей судна, которые возникают в результате приема партий контейнеров загрузки судна. Предложены процедуры определения предельно-граничных значений моментов, которые обеспечивают допустимый дифферент судна. Также получены аналитические выражения, с помощью которых определяется распределение веса партий загрузки, обеспечивающего необходимый дифферент судна и его общую продольную прочность.

Для подтверждения корректности предлагаемого способа с помощью компьютерной программы была сформирована загрузка судна «Скай Джемени» тремя партиями контейнеров. Рассмотренная загрузка удовлетворяет требованиям мореходной безопасности.

Ключевые слова: мореходная безопасность судов, загрузки контейнеровозов, планирование размещения контейнеров партии, имитационное моделирование загрузки судна.

DOI: 10.33815/2313-4763.2020.1.22.064-073

Постановка проблемы. Размещение контейнеров при загрузке судна в нескольких портах необходимо производить с учетом последовательности портов выгрузки, обеспечивая возможность доступа к необходимым партиям. Также следует учитывать, что промежуточные состояния загрузки судна при переходе между портами должны отвечать требованиям его мореходной безопасности, а возникающие силы инерции находятся в допустимых пределах.

Вопросам обеспечения мореходной безопасности в силу их актуальности посвящены многие работы современных исследователей.

Анализ последних достижений и публикаций. В работе [1] исследована корреляционная зависимость между формой корпуса судна и его диаграммой статической остойчивости, а также рассмотрена задача синтеза формы корпуса с заданной величиной метацентрической высоты. В работе получено аппроксимированное выражение расчета метацентрической высоты, а в монографии [2] подробно рассмотрены вопросы обеспечения мореходной безопасности судов, в частности, имеющих отношение к их посадке, остойчивости и общей продольной прочности.

Общие принципы оптимизации загрузки навалочных судов рассмотрены в работе [3], а учету особенностей загрузки генеральных грузов и выбору ее оптимального варианта посвящена работа [4].

В работе [5] представлена модель бортовой качки накатных судов с уравновешивающим расположением помещений в ситуации затопления их части и проведено ее исследование. Метод расчета диаграммы нагрузок и анализа последовательного разрушения при заданных начальных деформациях и остаточных напряжениях рассматривается в работе [6], в ней также описаны метод расчета предельной прочности продольных балок корпуса судна и метод подкрепленной панели.

В статье [7] указывается, что на основе многолетнего опыта эксплуатации судов в арктических районах был собран статистический материал, с помощью которого были разработаны методы расчетов запаса надежности судовых конструкций. Патент [8] посвящен способу обеспечения плавучести аварийного судна типа RO-RO и паромов, причем способом предусмотрено использование закрытых емкостей, которые установлены по бортам и под палубой вдоль и поперек судна.

В статье [9] предложены процедуры размещения контейнеров по бейтам и ярусам грузового помещения с учетом требований по мореходной безопасности судна и приведены аналитические выражения для формирования допустимого тензора загрузки судна. В работе показано, что грузовое помещение имеет сотовый тип, причем ячейка соты является потенциальным контейнерным местом. Различные численные методы оценки прочности и вибрации судна описываются в работе [10] и показано, что наиболее эффективным является метод конечных элементов.

Цель статьи. Целью настоящей статьи является рассмотрение способа формирования плана загрузки контейнеровоза.

Изложение основного материала. Как показано в работе [9], при планировании рейса судна необходимо начинать с последней загрузки судна G_{N-1} перед выходом в последний N -й порт, причем загрузка состоит из P_i^N партий контейнеров, т. е. $G_{N-1} = \cup P_i^N$. Данная загрузка, как и остальные, должна удовлетворять требованиям мореходной безопасности. Рассмотрим этот вопрос более подробно.

Приращения статических моментов ΔM_x , ΔM_y и ΔM_z , которые возникают в результате приема партий контейнеров последней загрузки судна G_{N-1} определяются следующим образом:

$$\Delta M_x = \sum_{k=1}^n W_{i_k}^N X_{i_k}^N;$$

$$\Delta M_y = \sum_{k=1}^n W_{i_k}^N Y_{i_k}^N;$$

$$\Delta M_z = \sum_{k=1}^n W_{i_k}^N Z_{i_k}^N;$$

$$W_i^N = \sum_{k=1}^n W_{i_k}^N,$$

где n – число грузовых помещений; $W_{i_k}^N$ – вес груза части партии P_i^N в k -м помещении; $X_{i_k}^N$, $Y_{i_k}^N$ и $Z_{i_k}^N$ – координаты центра тяжести части партии P_i^N .

Для обеспечения мореходной безопасности приращения статических моментов ΔM_x , ΔM_y и ΔM_z должны удовлетворять следующим требованиям:

$$\Delta M_x \in \Delta M_d; \Delta M_y = 0; \Delta M_z \in \Delta M_h,$$

где ΔM_d и ΔM_h – множества моментов, которые обеспечивают требуемые значения дифферента, остойчивости и общей продольной прочности судна.

Рассмотрим процедуру оценки множеств моментов ΔM_d и ΔM_h . Прежде всего отметим, что в результате загрузки контейнеров дифферент судна d должен находиться в пределах от 0 до -2,0 м. Из указанного интервала выбирается дифферент, которому соответствует размещение контейнеров, удовлетворяющее требованиям продольной прочности. Поэтому для загрузки необходимо найти граничные значения момента $M_{x(0)}$ и $M_{x(-2)}$, которые обеспечивают дифферент судна 0 и -2,0 м. Для этого воспользуемся известными зависимостями [2]:

$$M_x = D(x_g - x_c), d = M_x / \bar{M},$$

где x_g и x_c – соответственно абсцисса центра тяжести судна и абсцисса центра величины, соответствующая водоизмещению D ; \bar{M} – момент, дифференцирующий судно на один сантиметр.

Очевидно, в этом случае:

$$x_g = x_c + \frac{d\bar{M}}{D}.$$

С другой стороны:

$$x_g = \frac{M_{Xp} + M_{Xz} + M_{Xb} + M_{Xc}}{D},$$

где M_{Xp} , M_{Xz} , M_{Xb} , и M_{Xc} – составляющие момента M_X соответственно судна порожнем, запасов, балласта и груза.

Очевидно, интересующая нас составляющая M_{Xc} , возникающая от загрузки контейнеров, с учетом двух последних равенств, определяется из выражения:

$$M_{Xc} = Dx_c + d\bar{M} - \Delta\tilde{M}_X,$$

где $\Delta\tilde{M}_X = M_{Xp} + M_{Xz} + M_{Xb}$, или $\Delta\tilde{M}_X = M_{Xconst} + M_{Xb}$.

Причем $M_{Xconst} = M_{Xp} + M_{Xz}$ – постоянная величина.

Поэтому граничные моменты $M_{Xc(0)}$ и $M_{Xc(-2)}$ партий контейнеров загрузки рассчитываются по формулам:

$$\begin{aligned} M_{Xc(0)} &= D_1 x_{c1} - \Delta\tilde{M}_X; \\ M_{Xc(-2)} &= D_1 x_{c1} - 200\bar{M} - \Delta\tilde{M}_X, \end{aligned}$$

где D_1 – водоизмещение судна после загрузки.

Очевидно, множество $\Delta M_d = [M_{Xc(0)}, M_{Xc(-2)}]$.

Аналогично определяется граничное значение статического момента M_{Z^*} , при котором метацентрическая высота равна минимальному значению 0,15 м. По определению:

$$h = Z_m - Z_g = 0,15 \text{ и } Z_g = \frac{M_{Z^*}}{D}.$$

Следовательно,

$$M_{Z^*} = D(Z_m - 0,15).$$

Так как $M_{Z^*} = M_{Zc^*} + \Delta\tilde{M}_Z$, где величина $\Delta\tilde{M}_Z = M_{Zp} + M_{Zz} + M_{Zb}$, то предельный статический момент M_{Zc^*} , создаваемый партиями загруженных контейнеров, определяется выражением:

$$M_{Zc^*} = D(Z_m - 0,15) - \Delta\tilde{M}_Z.$$

В рассматриваемом случае $\Delta\tilde{M}_Z = M_{Zconst} + M_{Zb}$, где M_{Zconst} является постоянной величиной.

Для предельно допустимой максимальной метацентрической высоты h_{mx} статический момент M_{Zc^*} рассчитывается по формуле:

$$M_{Zc^*} = D(Z_m - h_{mx}) - \Delta\tilde{M}_Z.$$

Поэтому $\Delta M_h = [M_{Zc^*}, M_{Zc}^*]$.

В этом случае для обеспечения остойчивости приращение статического момента ΔM_z загрузки выбирается следующим образом:

$$\Delta M_z = \sum_j M_{hj} = M_h \in \Delta M_h, \quad (1)$$

где M_{hj} – вертикальный статический момент, создаваемый j -й партией загрузки.

Рассмотрим размещение партий контейнеров последней загрузки G_{N-1} по грузовым помещениям судна, при котором создается заданный дифференцирующий момент $M_d \in \Delta M_d$. В этом случае должно выполняться равенство $\Delta M_x = M_d$. При этом следует задавать M_d как можно ближе к среднему значению интервала ΔM_d . Так как загрузка G_{N-1} содержит партии контейнеров P_i^N , то статический момент ΔM_x является суммой моментов ΔM_{xi} партий контейнеров P_i^N , т. е. $\Delta M_x = \sum \Delta M_{xi}$. Очевидно, что моменты ΔM_{xi} партий целесообразно выбирать пропорционально их весам W_i^N , т. е. $\Delta M_{xi} = \Delta M_x \frac{W_i^N}{W_{GN}}$, где

$W_{GN} = \sum W_i^N$ – суммарный вес контейнеров последней загрузки G_{N-1} . Партии контейнеров P_i^N размещаются в соответствующих помещениях H_i^N , причем под помещением партии подразумевается множество «ячеек» с координатами их центра, количеством, равным числу контейнеров партии. Помещение партии может состоять из нескольких полностью или частично использованных трюмов, «ячейки» которых заполнены без пропусков. Структура помещения представляется беями, ярусами и рядами. Распределение веса партии контейнеров P_i^N по грузовым помещениям H_i^N , т.е. контейнеров по «ячейкам» грузовых помещений, Q_i^N должно создать требуемый момент ΔM_{xi} . Этот момент определяется размещением контейнеров по беям помещений H_i^N .

Распределение веса W_{GN} партии контейнеров последней загрузки судна G_{N-1} по грузовым помещениям должно удовлетворять уравнениям:

$$\Delta M_x = \sum \Delta M_{xi} = \sum M_{di} = M_d = \sum_{k=1}^n W_{i_k}^N X_{i_k}^N;$$

$$\sum_{k=1}^n W_{i_k}^N = W_{GN},$$

где n – число грузовых помещений в наборе H_{N-1} .

Партия контейнеров P_i^N , размещенная в грузовых помещениях H_i^N , должна создавать дифференцирующий момент $M_{di} = \sum_{j=1}^m \Delta M_{dij}$, причем создаваемое j -м грузовым

помещением из набора H_i^N приращение заданного момента ΔM_{dij} имеет следующее выражение:

$$\Delta M_{dij} = \{k_{ij}P_{cpi} + \frac{jX_i^N}{L}\Delta P\}X_i^N,$$

где k_{ij} – часть j -го грузового помещения, занимаемая партией P_i^N ; L – суммарная длина всех грузовых помещений судна; jX_i^N – абсцисса центра тяжести части партии P_i^N .

Для всех грузовых помещений набора H_i^N , в которых размещается партия P_i^N , справедливо выражение:

$$\sum_{j=1}^m \{k_{ij}P_{cpi} + \frac{jX_i^N}{L}\Delta P\}X_i^N = M_{di},$$

из которого

$$\frac{\Delta P}{L} \sum_{j=1}^m (jX_i^N)^2 = M_{di} - \sum_{j=1}^m k_{ij}P_{cpi}X_i^N,$$

поэтому

$$\Delta P = \frac{L(M_{di} - \sum_{j=1}^m k_{ij}P_{cpi}X_i^N)}{\sum_{j=1}^m (jX_i^N)^2}, \tag{2}$$

Следовательно, количество груза в j -м помещении определяется выражением:

$$P_j = k_{ij}P_{cpi} + \frac{jX_i^N}{L}\Delta P$$

или с учетом полученного выражения для расчета ΔP :

$$P_j = k_{ij}P_{cpi} + \frac{jX_i^N}{\sum_{j=1}^m (jX_i^N)^2} (M_{di} - \sum_{j=1}^m k_{ij}P_{cpi}X_i^N).$$

С целью поиска формулы для расчета P_{cpi} найдем выражение для суммы весов P_j частей партии P_i^N по помещениям:

$$\sum_{j=1}^m \{k_{ij}P_{cpi} + \frac{jX_i^N}{\sum_{j=1}^m (jX_i^N)^2} (M_{di} - \sum_{j=1}^m k_{ij}P_{cpi}X_i^N)\} =$$

$$P_{cpi} \sum_{j=1}^m k_{ij} + \frac{1}{\sum_{j=1}^m (jX_i^N)^2} \{M_{di} \sum_{j=1}^m jX_i^N - P_{cpi} \sum_{j=1}^m [jX_i^N \sum_{j=1}^m k_{ij}X_i^N]\} = W_i^N,$$

где W_i^N – вес контейнеров партии P_i^N .

Введем обозначения постоянных величин $A = \sum_{j=1}^m jX_i^N$, $B = \sum_{j=1}^m (jX_i^N)^2$,

$C = \sum_{j=1}^m [jX_i^N \sum_{j=1}^m k_{ij}X_i^N]$, $D = \sum_{j=1}^m k_{ij}$ и получим:

$$DP_{\text{cpi}} + \frac{1}{B} \{AM_{\text{di}} - CP_{\text{cpi}}\} = W_i^N. \quad (3)$$

Из полученного выражения следует:

$$P_{\text{cpi}} \left(D - \frac{C}{B}\right) = W_i^N - \frac{A}{B} M_{\text{di}}.$$

Следовательно:

$$P_{\text{cpi}} = \frac{W_i^N - \frac{A}{B} M_{\text{di}}}{D - \frac{C}{B}}.$$

Подставляя полученное выражение для величины P_{cpi} в уравнение (3), убеждаемся в правильности соотношения:

$$D \left(\frac{W_i^N - \frac{A}{B} M_{\text{di}}}{D - \frac{C}{B}} \right) + \frac{1}{B} \left[AM_{\text{di}} - C \left(\frac{W_i^N - \frac{A}{B} M_{\text{di}}}{D - \frac{C}{B}} \right) \right] = W_i^N.$$

Очевидно, суммарный момент ΔM_{xi} по всем грузовым помещениям набора H_i^N , в которых размещается партия P_i^N , должен быть равен M_{di} :

$$\Delta M_{xi} = \sum_{j=1}^m \left\{ k_{ij} P_{\text{cpi}} + \frac{j X_i^N}{L} \Delta P \right\} X_i^N = M_{\text{di}}.$$

Для доказательства в последнее равенство следует подставить выражение (2).

Таким образом, для загрузки партии P_i^N в помещения H_i^N и создания необходимого дифференцирующего момента M_{di} в каждое j -е помещение загружается вес:

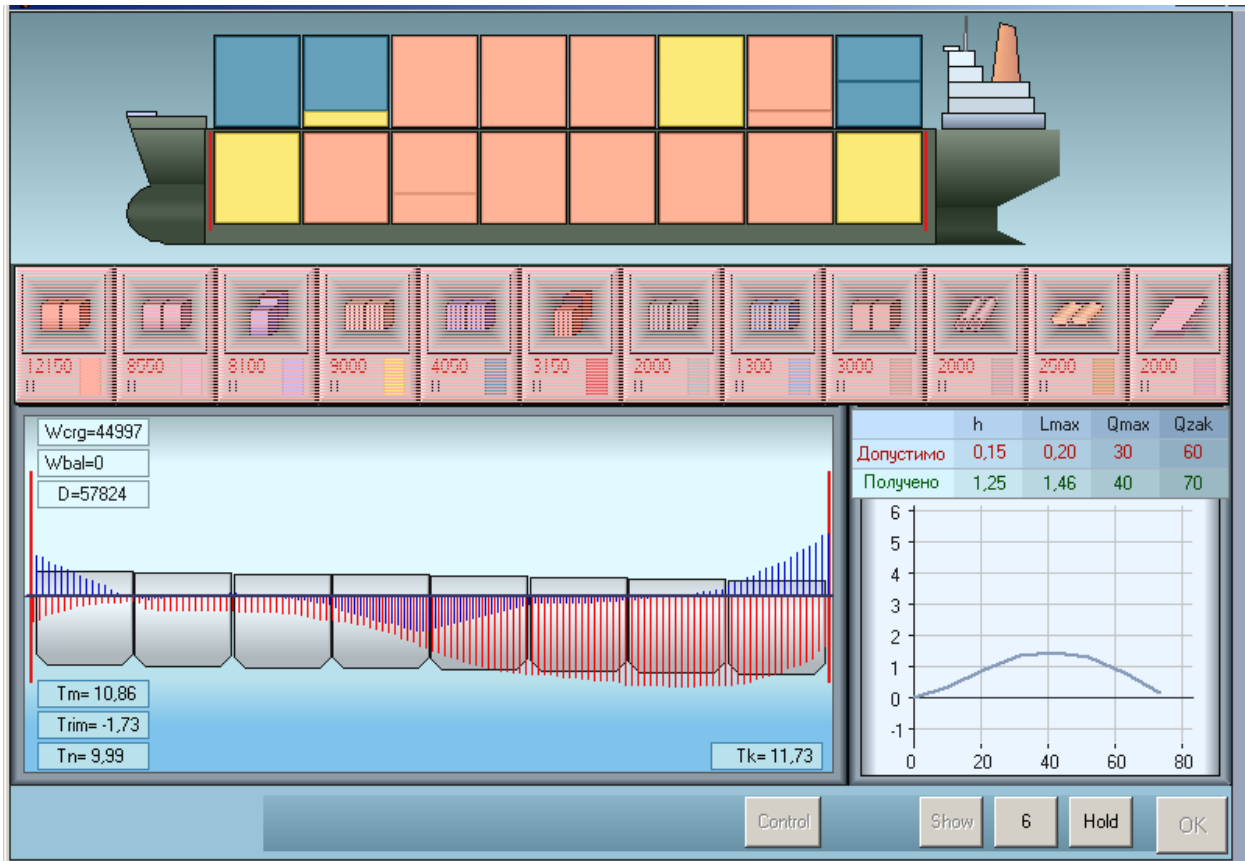
$$P_j = k_{ij} P_{\text{cpi}} + \frac{j X_i^N}{L} \Delta P,$$

причем величина P_{cpi} рассчитывается с помощью выражения (3), а величина ΔP - по формуле (2). Аналогично размещаются остальные партии контейнеров последней загрузки G_{N-1} .

Для обеспечения остойчивости судна расположение весов контейнеров по ярусам производится с учетом выражения (1).

В качестве примера применения предлагаемого способа рассмотрим формирование загрузки судна «Скай Джемени», которое может принимать контейнеры в восемь трюмов и на их крышки. Размещение контейнеров может производиться в 16 грузовых помещениях (1÷8 трюма и 9÷16 крышки трюмов). В каждом из грузовых помещений можно разместить 192 двадцатифутовых контейнера (четыре бея по шесть ярусов, каждый из которых содержит восемь контейнеров). Судно характеризуется максимальной средней осадкой 13,0 м и максимальным водоизмещением 68318 т. С помощью разработанной программы была сформирована загрузка судна тремя партиями контейнеров, размещение которой показано на рис.1. На рисунке первая партия контейнеров, окрашенная в оранжевый цвет, весом 28800 т. и числом 1920 контейнеров размещена в десяти грузовых помещениях. Вторая партия, желтого цвета, состоящая из 600 контейнеров весом 9000 т, расположена в

четырёх помещениях, а третья партия – в трех. Контейнеры третьей партии окрашены в синий цвет, ее вес составляет 7200 т, и она состоит из 552 контейнеров.



Риунок 1 – Размещение контейнеров загрузки и характеристики мореходной безопасности

Компьютерная программа содержит модуль оценки параметров посадки, устойчивости и общей продольной прочности, которые представлены на нижней половине рис. 1. Как следует из рисунка, характеристики мореходной безопасности находятся в допустимых пределах.

Выводы

1. Рассмотрен способ формирования плана загрузки контейнеровоза, предусматривающий размещение контейнеров по грузовым помещениям, при котором выполняются требования по мореходной безопасности судна.

2. Получены аналитические выражения реализации данного способа, с помощью которых определяются граничные значения допустимых интервалов статических моментов, обеспечивающих мореходную безопасность судна, а также распределение веса партий загрузки, обеспечивающего необходимый дифферент судна и его общую продольную прочность.

3. Приведен пример загрузки судна с использованием предлагаемого способа, и с помощью компьютерной программы подтверждена его корректность.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Xia Jinzhu, Jensen Jorgen, Pedersen Preben Terndrup. A dynamic model for roll motion of ships due to flooding. *Schiffstechnik*, 1999. 46, № 4. P. 208–216.
2. Сизов В. Г. Теория корабля. Одесса : Феникс, 2003. 282 с.
3. Васьков Ю. Ю. Некоторые вопросы оптимизации грузовых операций навалочных судов. *Судовождение*. 2003. № 6. С. 40–45.

4. Чепок А. О. Разработка процедуры отображения укладки генерального груза в трюмах судна. *Судовождение : сб. научн. трудов.* Одесса : ИздатИнформ, 2011. Вып. 20. С. 243–246.

5. Simonovich Milivoje, Sizov Victor G, Vorobjov Yuri L. The correlation of ship hull form and her static stability diagram. *21 Jugosloven. kongr. teor. i primenjene meh.* 1995. P. 167–173.

6. Kulesh Victor A. Computer investigation of construction reliability. Proc. 6th Int. Offshore and Polar Eng. Conf., Los Angeles, Calif., May 26-31, 1996. Vol. 4. Golden (Golo) P. 395–401.

7. Wan Zheng, He Fu. Estimation of ultimate strength of ship`s hull girders. *Ship Mech.* 2003. 7, № 3. P. 58–67.

8. RO-RO ship/ferry with buoyancy tanks to prevent capsizing. Заявка 2264665 Великобритания МКИ6 В 63 В 43/12 / Shatawy Ahmed Ahmed El. № 9422061.3; заявл. 2.11.94; опубл. 8.5.96; НКИ В7А.

9. Власенко Е. А. Допустимая загрузка контейнеровоза. *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences.* 2018. VI (22), Issue: 186. С. 87–96.

10. Miller Lutz. Advanced calculation techniques for ship structural design. *Germ. Maritime Ind. J.* 1992. 8, Spec. Issue. P. 37–40.

REFERENCES

1. Xia Jinzhu, Jensen Jorgen, Pedersen Preben Terndrup (1999). A dynamic model for roll motion of ships due to flooding. *Schiffstechnik*, 46, № 4, 208–216.

2. Sizov V. G. (2003). Theory of ship. Odessa : Phenix.

3. Vaskov Yu. Yu. (2003). Some questions of optimization of cargo operations of loading vessels. *Sudovozhdenie*, № 6, 40–45.

4. Chepok A. O. (2011). Development of procedures of reflection of piling of general load in the holds of ship. *Sb. nauchn. trudov, Vyp. 26.* Odessa : IzdatInform. 243–246.

5. Simonovich Milivoje, Sizov Victor G, Vorobjov Yuri L. (1995). The correlation of ship hull form and her static stability diagram. *21 Jugosloven. kongr. teor. i primenjene meh.*, 167–173.

6. Kulesh Victor A. (1996). Computer investigation of construction reliability. *Proc. 6th Int. Offshore and Polar Eng. Conf.* (Los Angeles, Calif., May 26-31, 1996). Golden (Golo). Vol. 4, 395–401.

7. Wan Zheng, He Fu. (2003). Estimation of ultimate strength of ship`s hull girders. *Ship Mech.* 7, № 3, 58–67.

8. RO-RO ship/ferry with buoyancy tanks to prevent capsizing/ Request 2264665 Great Britain МКИ6 В 63 В 43/12 / Shatawy Ahmed Ahmed El. № 9422061.3; Zayavl. 2.11.94; Opubl. 8.5.96; NKI V7A.

9. Vlasenko E. A. (2018). Possible loading of containership / Vlasenko E.A.// Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, VI(22), Issue: 186, 2018.- P. 87 - 96.

10. Miller Lutz. Advanced calculation techniques for ship structural design./ Miller Lutz.// Germ. Maritime Ind. J. - 1992. - 8, Spec. Issue. - P. 37 - 40.

Цимбал М. М. ФОРМУВАННЯ ПЛАНУ ЗАВАНТАЖЕННЯ КОНТЕЙНЕРОВОЗА

У роботі розглянуто питання розміщення контейнерів при завантаженні судна з урахуванням послідовності портів вивантаження для забезпечення доступу до необхідних партій, а також та обставина, що проміжні стани завантаження судна при переході між портами повинні відповідати вимогам його морехідної безпеки, а сили інерції, що виникають, знаходяться в допустимих межах. Тому запропонований спосіб формування плану завантаження контейнеровоза, що передбачає розміщення контейнерів по вантажних приміщеннях, при якому виконуються вимоги з посадки, остійності і загальній поздовжній міцності судна.

Наведено вирази для розрахунку приростів статичних моментів щодо осей судна, які виникають у результаті прийому партій контейнерів завантаження судна. Зазначено, що в результаті завантаження контейнерів диферент судна повинен знаходитися в межах від 0 до -2,0 м. З вказаного інтервалу вибирається диферент, якому відповідає розміщення контейнерів, що задовольняє вимогам подовжньої міцності. Тому для завантаження судна запропоновані процедури визначення граничних значень моментів, які забезпечують диферент судна від 0 до -2,0 м. Також одержано аналітичні вирази, за допомогою яких визначається розподіл ваги партій завантаження, який забезпечує необхідний диферент судна і його загальну поздовжню міцність. Для цього одержано формули розрахунку середньої ваги частини партії контейнерів, яка знаходиться в кожному з вантажних приміщень, вибраних для завантаження контейнерів партії, а також запропоновано вирази для визначення ваги вантажу в кожному вантажному приміщенні залежно від його розташування по довжині і висоті судна.

Розглянуто процедуру сумісного урахування розміщення контейнерів різних партій завантаження судна на параметри посадки, остійності і загальної поздовжньої міцності судна. Для цього проводиться визначення складової необхідного статичного моменту залежно від частки ваги партії в загальній вазі завантаження судна.

Для підтвердження коректності запропонованого способу за допомогою комп'ютерної програми було розраховане завантаження судна «Скай Джемені», яке може приймати контейнери у вісім трюмів і на їх кришки. Судно характеризується максимальним середнім осіданням 13,0 м і максимальною водотоннажністю 68318 т. За допомогою розробленої програми було сформоване завантаження судна трьома партіями контейнерів, причому перша партія контейнерів вагою 28800 т і числом 1920 контейнерів розміщена в десяти вантажних приміщеннях, друга партія, що складається з 600 контейнерів вагою 9000 т, розташована в чотирьох приміщеннях, а третя партія вагою 7200 т і чисельністю 552 контейнери – в трьох приміщеннях. Розглянуте завантаження задовольняє вимоги морехідної безпеки.

Ключові слова: морехідна безпека суден, завантаження контейнеровозів, планування розміщення контейнерів партії, імітаційне моделювання завантаження судна.

Tsymbal M. M. THE FORMATION OF THE CONTAINER VESSEL LOADING PLAN

Placing containers while loading the vessel taking into account the ports of unloading sequence for providing the access to necessary parties are considered in this article. Also it is viewed within the circumstances of intermediate states of loading the vessel in transition between ports, which must respond to the nautical safety, and arising inertia forces should be within acceptable limits.

Therefore the method of forming the container carrier loading plan is offered, foreseeing placing containers in the cargo holds, which executes requirements to the landing, stability and overall longitudinal strength of the vessel.

The calculation of static moment's increment on vessel's axes, which arise in a result of receiving parties of containers while loading the vessel, is presented. One of the requirements is saving trim on the level from 0 to -2,0m. The trim should stay in these limits while loading the vessel due to suitable longitudinal strength. Therefore procedures for determining the limited moments' values while loading the vessel, which should provide trim for the above-mentioned limits from 0 to -2,0m, are proposed. Analytical expressions, which are used to determine the weight distribution of loading lots providing the required trim of the vessel and its overall longitudinal strength, are also obtained. To do this, formulas were obtained for calculating the average weight of the containers parties located in each cargo hold selected for loading, and also proposed expressions for determining the weight of cargo in each cargo hold depending on its location along the length and height of the vessel.

The procedure of joint placement consideration of how different container load parties can influence on the parameters of landing, stability and overall longitudinal strength of the vessel is presented. To do this, the component of the required static moment depending on the parties' share weight of the whole weight of the vessel is determined.

To confirm the correctness of the proposed method, the load plan of the ship «Sky Gemini» was calculated with the help of a computer program. «Sky Gemini» can accept containers in eight holds and on their hatches. The vessel is characterized by a maximum average draught of 13,0 m and a maximum displacement of 68318 tons. The loading plan of the above-mentioned vessel was formed with the help of the developed program by three container parties. The first one is 1900 containers weighing 28800 tons is loaded in 10 cargo holds; the second one consists of 600 containers weighing 9000 tons, located in four holds, and the third one weighing 7200 tons and consists of 552 containers is located in three holds. The considered loading satisfies requirements of seaworthiness.

Key words: *maritime safety of vessels, loading of container vessels, planning of container parties placement, simulation modeling of vessel's loading.*

© Цимбал М.М.

Статтю прийнято
до редакції 26.08.20

УДК 629.1

МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ РОБОТИ УСТАТКУВАННЯ РІЧКОВОГО ТА МОРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ ЗАВДЯКИ ВИКОРИСТАННЯ МОДИФІКОВАНИХ ЗАХИСНИХ АНТИКОРОЗІЙНИХ ПОКРИТТІВ

Чернявська Т. В., аспірант кафедри транспортних технологій та механічної інженерії Херсонської державної морської академії, ORCID: 0000-0003-4019-9715

Стаття присвячена вирішенню науково-технічної задачі, яка полягає у підвищенні ресурсу роботи устаткування річкового та морського транспорту за рахунок використання розроблених полімерних композитних модифікованих антикорозійних захисних покриттів. Вирішення науково-технічної задачі полягає у розробці методу спрямованого керування процесами взаємодії між компонентами епоксидного полімеру, що дозволило створити новий клас композитних матеріалів і покриттів на їх основі з високими показниками експлуатаційних характеристик, призначених для відновлення засобів водного транспорту.

Встановлено нові закономірності підвищення ресурсу і корозійної стійкості засобів транспорту завдяки рахунок формуванню покриттів, які містять у комплексі модифікатор фталімід (0,25 мас.ч.) та синтезовану залізо-карбідну шихту (0,2...0,5 мас.ч.) на 100 мас.ч. епоксидного олігомера ЕД-20, що дозволяє при їх уведенні у полімер за оптимального вмісту отримувати матеріали з поліпшеними когезійними властивостями завдяки значній питомій площі поверхні дисперсних добавок і підвищеної їх активності до міжфазової взаємодії.

Вперше розроблено технологічну схему формування покриттів, завдяки якій досягнуто синергетичний ефект у підвищенні ресурсу роботи устаткування річкового та морського транспорту і поліпшенні антикорозійних властивостей захисних покриттів у результаті комплексного впливу модифікатора фталіміду, мікродисперсного наповнювача синтезованої залізо-карбідної шихти та фітинової кислоти. Методом ІЧ-спектроскопії обґрунтовано зростання ступеня зшивання тривимірної сітки полімера, що забезпечує поліпшення властивостей композитів. Це зумовлено тим, що на поверхні часток після синтезу локалізуються ділянки карбідів титану і заліза, які в основному і є активаторами створення фізичних і хімічних міжфазових зв'язків при структуроутворенні антикорозійних покриттів.

Ключові слова: матриця, епоксидний композит, модифікатор, наповнювач, властивості, антикорозійне покриття.

DOI: 10.33815/2313-4763.2020.1.22.074-083

Постановка проблеми. Актуальність даного напрямку досліджень зумовлена тим, що, незважаючи на широкий спектр відомих на сьогодні полімерних композитів, які використовують для захисту засобів морського та річкового транспорту, найбільш поширеними є антикорозійні адгезиви на основі епоксидних олігомерів. При формуванні таких матеріалів на стадії зшивання у зв'язувач вводять різного роду добавки, що забезпечує підвищення ступеня гелеутворення гетерогенних систем і, як наслідок, призводить до поліпшення їхніх властивостей. Водночас слід зазначити, що сучасні судна водного транспорту піддаються впливу динаміки кліматичних навантажень унаслідок роботи у різних часових поясах у невеликому часовому проміжку. Це передбачає експлуатацію як корпусів суден, так машин і механізмів під впливом динаміки критичних температур, що призводить до швидкого старіння устаткування. Насамперед це стосується захисних антикорозійних покриттів, які піддаються впливу водночас динамічних, механічних і термічних навантажень. Тому дослідження і аналіз антикорозійних властивостей, а також розробка полімерних покриттів за різних умов експлуатації є актуальною задачею забезпечення надійності деталей і транспортних засобів в цілому.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні прослідковується широке застосування захисних антикорозійних полімерних покриттів, зокрема на основі епоксидних смол, у різних галузях промисловості, де існує вплив агресивного середовища. Окрім того, у багатьох роботах [1–6] описано, що для підвищення властивостей покриттів на основі епоксидних смол вводять до їх складу нано- та мікронаповнювачі. Важливим параметром часток є їх питома поверхня, за допомогою якої відбувається їх взаємодія з

функціональними групами полімерів. Водночас молекули полімерної матриці адсорбуються на частки, а адгезійні сили забезпечують міцне з'єднання. У світі активно ведуться дослідження факторів, що визначають ефективність модифікації полімерних матеріалів мікрочастками. Згідно з літературними даними [7], суттєвий вплив мають такі фактори, як розмір, форма і кількість часток, їх розподіл у матричному матеріалі, площа поверхні взаємодії «полімер-частка». Значна кількість досліджень указує, що модифікація нано- і мікродисперсними частками епоксидних композицій впливає на їх механічні властивості. Зокрема, дослідження поведінки композитів при розтягуванні та згинанні підтверджують такі ефекти, як збільшення модуля пружності і жорсткості, а також зниження пластичності матеріалів [7, 8].

Отже, епоксидні матеріали, як антикорозійні покриття мають ряд переваг. Епоксидні покриття відрізняються підвищеними показниками теплостійкості та можуть застосовуватися при температурах експлуатації до 373 К. Крім того, вони можуть довго зберігатися просто неба. Також до них можна віднести технологічні характеристики при формуванні. Отверджування покриттів на транспортних засобах відбувається як за кімнатної температури, так і за знижених температурних режимів (за наявності каталізаторів). Покриття на епоксидній основі відрізняються високою стійкістю до дії агресивних середовищ, до подряпин, задирів, а також абразивного зносу, зберігаючи водночас високі механічні властивості [9]. Ряд переваг епоксидних покриттів характеризує їх стійкість до корозійних процесів. Мінімальна усадка в процесі зшивання сприяє зниженню залишкових напружень у покриттях. Покриття на епоксидній основі стійкі до катодного відшарування, з чим пов'язана відсутність виникнення стрес-корозії. Захисні антикорозійні покриття на основі епоксидних смол відрізняються високими бар'єрними властивостями. Ще одна важлива перевага епоксидних покриттів – це високі показники адгезійної міцності до різних металів [10, 11].

Мета роботи – збільшити ресурс засобів і деталей річкового та морського транспорту шляхом підвищення їх корозійної стійкості внаслідок установаження закономірностей формування структури і властивостей захисних епоксидних покриттів.

Матеріали та методика дослідження. Як основний компонент для зв'язувача при формуванні епоксидних КМ вибрано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84). Для зшивання епоксидних композицій використано твердник поліетиленполіамін ПЕПА (ТУ 6-05-241-202-78).

Як модифікатор використано фталімід. Молекулярна формула модифікатора: $C_8H_5NO_2$. Молярна маса фталіміду – 147,13 г/моль. Густина – 1,47 г/см³.

Як мікродисперсний наповнювач для експериментальних досліджень використано синтезовану залізо-карбідну шихту (СЗКШ). Формування наповнювача проводили високовольтним електророзрядним синтезом. Для високовольтного електророзрядного синтезу наповнювача використовували дослідний стенд, детально описаний у працях [12, 13]. У вигляді вихідного матеріалу використовували суміш порошків наступного вихідного складу: Fe (75 %) + Ti (25 %). Склад наповнювача після електророзрядного синтезу є наступним: Fe (70 %) + TiC (25 %) + Fe₃C (5 %). Розмір часток становить $d = 15 \dots 20$ мкм.

Додатково для поліпшення властивостей композитів у роботі використано частки фітинової кислоти дисперсністю $d = 8 \dots 10$ мкм. Молекулярна формула: $C_6H_{18}O_{24}P_6$. Молярна маса – 660,04 г/моль.

Корозійну стійкість захисних покриттів досліджували у лабораторних умовах, у результаті чого аналізували зміну опору і ємності зразків у часі під впливом агресивних середовищ. Для вимірювання опору і ємності захисних покриттів використовували прилад RCL-метр типу E7-22. Прилад під'єднували до вимірювальної комірки, у яку поміщали зразки у вигляді покриттів, нанесених на металеву основу. На покриття наклеювали скляні циліндри з діаметром $d = 25$ мм, які заповнювали морською водою (ТУУ 006: 2011). Упродовж 30 діб за температури $T = 293 \pm 2$ К вимірювали опір і ємність покриттів,

значення яких перераховували за формулами: $R_{кор} = R \cdot S, \text{кОм}$; $C_{кор} = C \cdot S, \text{пФ}$; $S = \pi D^2/4, \text{см}^2$. Для одержання середніх значень опору та ємності покриттів використано не менше 5 зразків, робоча площа яких становила – 4,9 см².

Результати досліджень та їх обговорення. На початковому етапі методом математичного планування експерименту встановлено оптимальний вміст модифікатора і мікродисперсного наповнювача у захисних покриттях: модифікатор фталімід – 0,25 мас.ч., синтезована залізо-карбідна шихта – 0,20...0,50 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомера ЕД-20. Уведення до епоксидного зв'язувача таких інгредієнтів дозволяє підвищити показники ударної в'язкості епоксидних композитів майже у два рази, порівняно з вихідною матрицею (до $W = 15,9...16,3 \text{ кДж/м}^2$). Отримані результати дозволяють створити матеріали з поліпшеними показниками фізико-механічних властивостей. Дані композити доцільно використовувати у вигляді захисних покриттів для підвищення експлуатаційних характеристик і відновлення засобів транспорту.

Для протикорозійного захисту засобів водного транспорту досліджували антикорозійні властивості розроблених і відомих полімерних композитних матеріалів (КМ) на основі модифікованого епоксидного зв'язувача з дисперсними наповнювачами, вміст яких установили попередньо на основі механічних випробувань.

Зазначимо, що епоксидний зв'язувач формували за наступного співвідношення компонентів – епоксидний олігомер (ЕД-20): твердник поліетиленполіамін (ПЕПА) – 100 : 10. Випробовували чотири склади антикорозійних композитів і покриттів на їх основі:

– КМ 1 (композит формували за наступного співвідношення компонентів – зв'язувач : модифікатор фталімід : мікродисперсний наповнювач у вигляді синтезованої залізо-карбідної шихти (СЗКШ) наступного складу: Fe (70 %) + TiC (25 %) + Fe₃C (5 %) ($d = 15...20 \text{ мкм}$) : мікродисперсний наповнювач у вигляді фітинової кислоти ($d = 8...10 \text{ мкм}$) – 100 : 0,25 : 0,20 : 0,25);

– КМ 2 (композит формували за наступного співвідношення компонентів – зв'язувач : модифікатор фталімід : мікродисперсний наповнювач у вигляді синтезованої залізо-карбідної шихти (СЗКШ) наступного складу: Fe (70 %) + TiC (25 %) + Fe₃C (5 %) ($d = 15...20 \text{ мкм}$) : мікродисперсний наповнювач у вигляді фітинової кислоти ($d = 8...10 \text{ мкм}$) – 100 : 0,25 : 0,50 : 0,25);

– КМ 3 – відоме корозійностійке епоксидне покриття для захисту технологічного устаткування суден [14];

– КМ 4 – відоме корозійностійке епоксидне покриття для захисту бортів і надбудов суден [15].

Корозійні дослідження зразків проводили у два етапи. На першому етапі корозійну стійкість захисних покриттів досліджували імпедансним методом, у результаті чого аналізували зміну опору і ємності зразків у часі під впливом середовища морської води. Експериментально встановлено (рис. 1), що після 30 діб витримки покриттів в умовах впливу агресивного середовища найвищим показником питомого опору ($\rho = 23,4 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$) є матеріал КМ 1. Аналогічно паралельно досліджували ємність розроблених і відомих матеріалів. Доведено (рис. 2), що за однакових умов випробувань найменшими ($C = 32 \times 10^2 \text{ пФ/см}^2$) показниками електричної ємності характеризується зразок на основі матеріалу КМ 1, що констатує достовірність отриманих результатів. Найкращі показники корозійної стійкості даного матеріалу можна пояснити насамперед оптимальним поєднанням інгредієнтів у епоксидній матриці. Зокрема, введення у полімер за гомеопатичного вмісту модифікатора, активного до міжфазової взаємодії синтезованої залізо-карбідної шихти, а також антиоксиданта, корозійностійкого й екологічно чистого порошку фітинової кислоти забезпечує максимальне підвищення ступеня гелеутворення епоксидної матриці. Такий матеріал є бар'єром до проникнення агресивного середовища, що підтверджено вище результатами експериментальних досліджень.

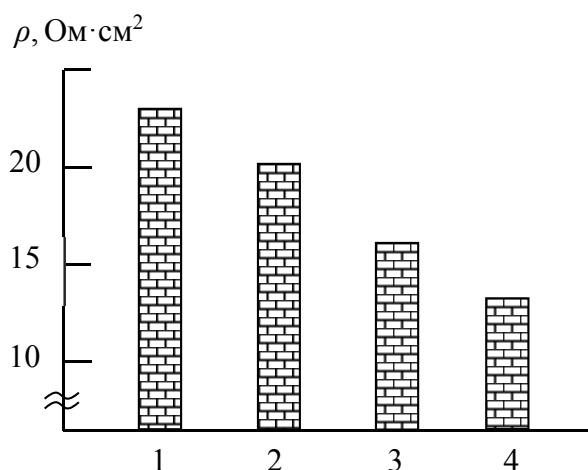


Рисунок 1 – Значення питомого опору захисних покриттів при частоті 1 кГц у агресивному середовищі морської води: 1 – КМ 1; 2 – КМ 2; 3 – КМ 3; 4 – КМ 4

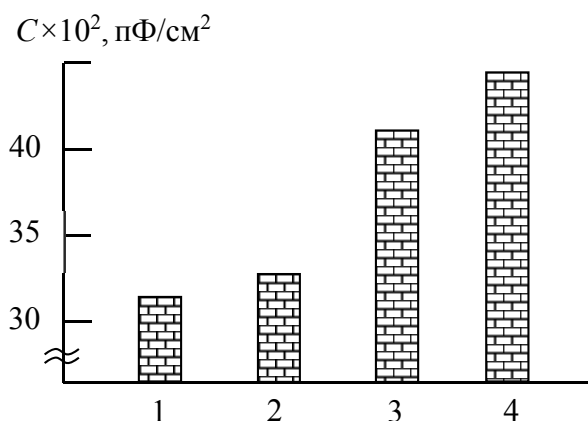


Рисунок 2 – Значення ємності захисних покриттів при частоті 1 кГц у агресивному середовищі морської води: 1 – КМ 1; 2 – КМ 2; 3 – КМ 3; 4 – КМ 4

Дещо гірші результати отримали при дослідженні матеріалу КМ 2. Для такого композиту після випробувань у морській воді отримали наступні значення опору та ємності: $\rho = 23,4 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$, $C = 32 \times 10^2 \text{ пФ/см}^2$. На наш погляд, це зумовлено дещо надмірною кількістю мікродисперсного наповнювача фітинової кислоти у матеріалі, що призводить до формування напруженого стану у структурі композиту. Відповідно, це погіршує когезійні властивості матеріалу у часі, що й позначається на його антикорозійних характеристиках.

Для порівняння за аналогічних умов досліджували корозійні характеристики відомих і широко впроваджених на сьогодні матеріалів [14, 15] на епоксидній основі, які використовують на сьогодні для захисту проти корозії засобів транспорту. Показано (рис. 1, 2), що для таких матеріалів (КМ 3, КМ 4) отримано наступні характеристики корозійної стійкості: $\rho = 14,5 \dots 16,8 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$, $C = (43 \dots 49) \times 10^2 \text{ пФ/см}^2$.

Можна констатувати, що у роботі розроблено матеріал (КМ 1) на основі модифікованої епоксидної матриці, наповненої активними дисперсними частками за оптимального вмісту, який у 1,4...1,6 разів (за показниками питомого опору) й у 1,3...1,5 разів (за показниками електричної ємності) має кращі антикорозійні властивості, порівнюючи з відомими світовими аналогами. Це є свідченням необхідності використання розробленого матеріалу для підвищення антикорозійних характеристик деталей водного транспорту, який експлуатують в умовах впливу механічних навантажень та теплового поля.

Корозійну стійкість захисних покриттів додатково визначали шляхом занурення зразків у наступні агресивні середовища: нафта, бензин, морська вода, річкова вода.

Результати дослідження показують високі експлуатаційні характеристики розроблених матеріалів. Зокрема, встановлено (табл. 1), що найвищою корозійною стійкістю (під якою у даному випадку розуміли зміну маси зразків після їх витримки в агресивних середовищах) характеризується матеріал КМ 1. Для нього зміна маси після витримки у середовищах становить 1,6...1,8 %. Водночас зазначимо, що для зразка з КМ 2 втрата маси у вибраних середовищах є несуттєво, але дещо вищою і становить 1,7...2,0 %. Отримані результати дослідження добре узгоджуються з наведеними вище результатами випробувань даних матеріалів щодо опору і ємності, що свідчить про їх достовірність.

Таблиця 1 – Корозійна стійкість КМ після витримки в агресивних середовищах впродовж часу $t = 720$ год за температури $T = 293 \pm 2$ К

Агресивне середовище	Зміна маси зразків, %			
	КМ 1	КМ 2	КМ 3	КМ 4
Нафта	1,6	1,7	2,3	2,5
Бензин	1,7	1,7	2,3	2,6
Морська вода	1,7	1,8	2,2	2,8
Річкова вода	1,8	2,0	2,7	2,9

Примітка: КМ 1, КМ 2 – розроблені матеріали; КМ 3 – композит Jotacote Universal N10 QD (Jotun, Норвегія) [14]; КМ 4 – композит Intershiel 300 (International, Великобританія) [15]

Порівнюючи результати дослідження зміни маси розроблених і відомих матеріалів у агресивних середовищах, можна констатувати наступне. Набухання у середовищах нафти, бензину, морської і річкової води зразків з розробленого матеріалу КМ 1 становить 1,6...1,8 %, що є меншим у 1,4...1,6 разів, порівнюючи з відомими і широко поширеними покриттями у світовому флоті. Водночас найагресивнішим з усього спектру досліджуваних середовищ є річкова вода. На наш погляд, це зумовлено наявністю достатньої кількості забруднень механічного, хімічного і біологічного характеру, що у комплексі суттєво впливає на старіння та динаміку руйнування усіх без винятку досліджуваних у даній роботі матеріалів.

У результаті проведених у даній роботі досліджень властивостей композитів розроблено епоксикомпозитний матеріал і захисне покриття на його основі для ремонту та захисту поверхонь засобів водного транспорту. Впровадження розроблених матеріалів заплановано на суховантажних судах, які експлуатують в умовах впливу агресивних середовищ «річка – море».

Антикорозійний полімеркомпозитний матеріал (АПМ). Основне призначення – поліпшення антикорозійних властивостей засобів морського та річкового транспорту. АПМ – матеріал на основі епоксидної матриці, модифікатора та двокомпонентного мікродисперсного наповнювача. Розроблений матеріал характеризується поліпшеними адгезійними властивостями та незначними залишковими напруженнями. Розроблений матеріал має високі показники фізико-механічних, теплофізичних властивостей і корозійної стійкості, а термін його експлуатації – 5...7 років.

Технологія формування епоксидних композитів полягає у наступному. На початковому етапі необхідно підігрівати епоксидну смолу до температури $T = 353 \pm 2$ К, витримувати її у тепловому полі впродовж часу $\tau = 20 \pm 0,1$ хв. Далі гідродинамічно суміщають смолу з модифікатором і мікродисперсним наповнювачем упродовж $\tau = 10 \pm 0,1$ хв, після чого проводять ультразвукове оброблення (УЗО) композиції упродовж $\tau = 1,5 \pm 0,1$ хв. Після охолодження суміші до кімнатної температури ($\tau = 60 \pm 5$ хв) вводять твердник і перемішують композицію впродовж $\tau = 5 \pm 0,1$ хв.

Температурно-часові параметри процесу термообробки показано на рис. 3.

Нанесення розробленого захисного покриття на суднові конструкції виконують методом пневматичного розпилення адгезиву товщиною 0,1...0,3 мм, що дозволяє суттєво підвищити адгезійну міцність, фізико-механічні властивості і корозійну тривкість захисних покриттів.

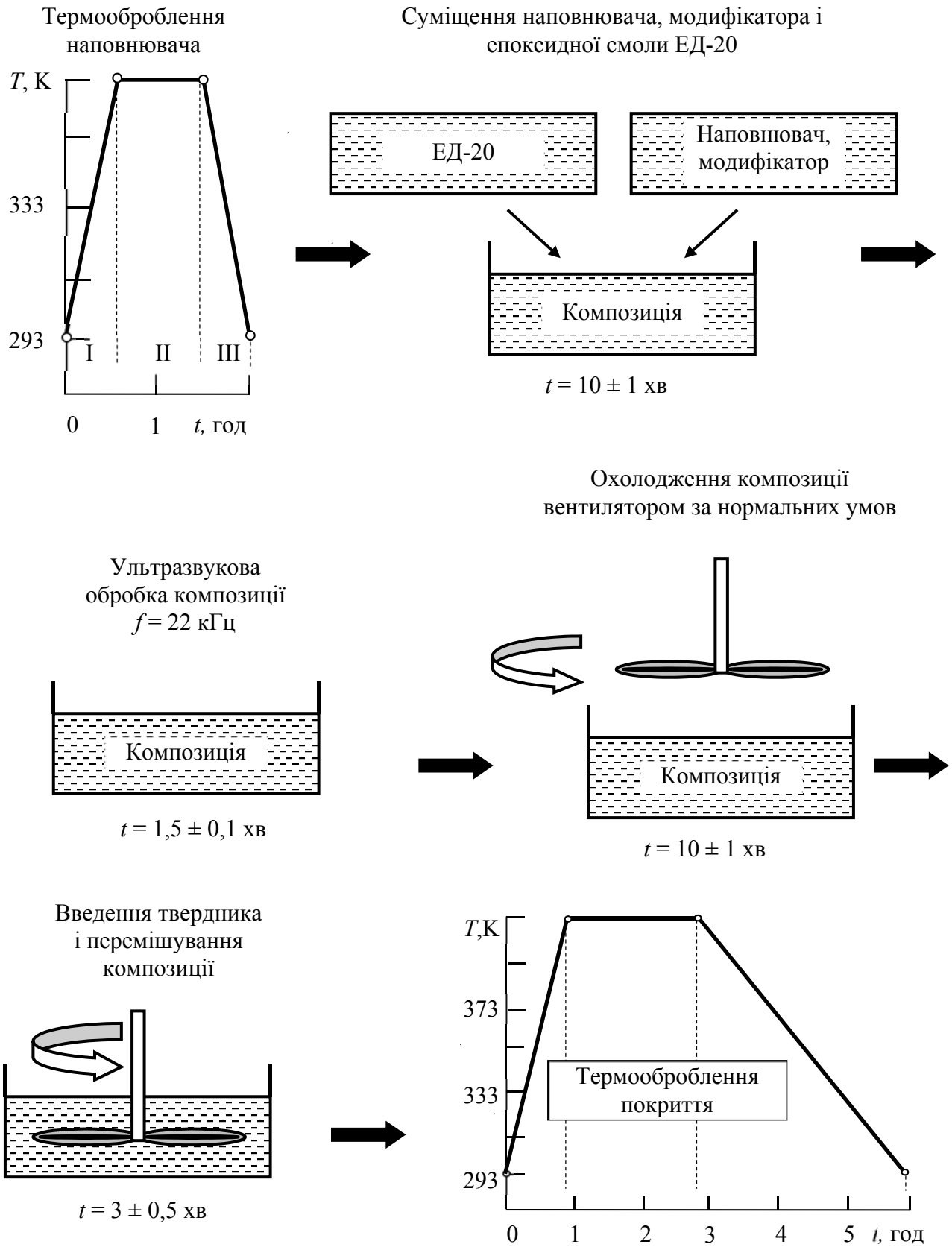


Рисунок 3 – Технологічна схема формування захисних покриттів

Зазначимо, що якість підготовки захисної поверхні значною мірою визначає надійність і довговічність захисного покриття. Підготовка поверхні полягає в знежирюванні та видаленні різних забруднень, окалини, іржі методом піскоструминного оброблення.

До епоксидної смоли додають наповнювачі у відповідних співвідношеннях та проводять їх гідродинамічне суміщення. Після гідродинамічного змішування компонентів уводять твердник безпосередньо перед нанесенням композиції на поверхню деталі.

Покриття з АПМ містить наступні компоненти, мас.ч.:

- епоксидний діановий олігомер ЕД-20 100
- твердник поліетиленполіамін (ПЕПА) 10
- модифікатор фталімід 0,2...0,4

Наповнювачі:

- синтезована залізо-карбідна шихта (Fe (70 %) + TiC (25 %) + Fe₃C (5 %)) ($d = 15...20$ мкм) 0,1...0,3
- фітинова кислота (8...10 мкм) 0,2...0,4

Результати порівняльних випробувань фізико-механічних, теплофізичних властивостей, корозійної стійкості розробленого і відомих матеріалів та захисних покриттів на їх основі свідчать про високі експлуатаційні характеристики та доцільність використання нових композитів для попередження корозії засобів водного транспорту (табл. 2).

Таблиця 2 – Порівняльні показники властивостей розробленого і відомих композитів

Показник	АПМ	КМ 1	КМ 2
Адгезійна міцність, σ_a , МПа	47,7	33,2	30,0
Руйнівні напруження при згинанні, σ_{zz} , МПа	84,9	64,8	58,4
Ударна в'язкість, W , кДж/м ²	14,7	7,4	6,8
Теплостійкість, T , К	364	347	350
Корозійна тривкість (опір покриття впродовж 30 діб витримки у морській воді), ρ , Ом·см ²	23,4	16,8	14,5

Примітка: АПМ – розроблений матеріал; КМ 1 – епоксидний композит Jotacote Universal N10 QD (Jotun, Норвегія); КМ 2 – епоксидний композит Intershield 300 (International, Великобританія).

Висновки

1. Розроблено метод збільшення ресурсу експлуатації деталей транспортних машин, який ґрунтується на використанні технології введення за оптимального вмісту модифікатора фталіміду і мікродисперсного наповнювача синтезованої високовольтним електророзрядом залізо-карбідної шихти ($d = 15...20$ мкм) при формуванні епоксидного захисного покриття з полішеними адгезійними, когезійними властивостями й ударною в'язкістю. Встановлено оптимальний вміст модифікатора і мікродисперсного наповнювача у захисних покриттях: модифікатор фталімід – 0,25 мас.ч., синтезована залізо-карбідна шихта – 0,20...0,50 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20. Уведення до епоксидного зв'язувача таких інгредієнтів дозволяє підвищити показники ударної в'язкості епоксидних композитів майже у два рази порівняно з вихідною матрицею (до $W = 15,9...16,3$ кДж/м²).

2. Для відновлення деталей технологічного устаткування морського та річкового транспорту розроблено антикорозійне епоксикомпозитне покриття. Встановлено, що найбільшим опором і найменшими показниками ємності характеризується захисне покриття на основі епоксидної матриці (100 мас.ч.) із вмістом добавок (модифікатор фталімід – $q = 0,25$ мас.ч., мікродисперсні наповнювачі: залізо-карбідна шихта – $q = 0,20$ мас.ч., фітинова кислота – $q = 0,25$ мас.ч.). Доведено, що після витримки в агресивному середовищі морської води зразків упродовж $\tau = 30$ діб питомий опір покриття становить $\rho = 23,4$ Ом·см², а показники його ємності – $C = 3200$ пФ/см². Доведено, що розроблений матеріал у 1,4...1,6 разів (за показниками питомого опору) і у 1,3...1,5 разів (за показниками електричної ємності) має кращі антикорозійні властивості, порівняно з

відомими світовими аналогами. Це є свідченням необхідності використання розробленого матеріалу для підвищення антикорозійних характеристик деталей водного транспорту, які експлуатують в умовах впливу механічних навантажень та теплового поля.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Полимерные композиционные материалы: прочность и технология / С. Л. Баженов [и др.]. Долгопрудный : Интеллект. 2010. 352 с.
2. Чвалун С.Н. Полимерные наноккомпозиты. *Природа*. 2000. №7 (86) С. 22–30.
3. F. Caruso. Nanoengineering of Particle Surfaces. *Adv. Mater.* 2001. № 1. 13. P. 11–22.
4. Амелін М. Ю. Забезпечення надійності транспортних засобів у контексті використання захисних полімерних наноккомпозитних покриттів. *Наукові нотатки*. Луцьк : ЛНТУ. 2018. Випуск 63. С. 14–21.
5. Сапронов О. О., Рожков О. С., Лещенко О. В., Голотенко О. С. Дослідження адгезійних і фізико-механічних властивостей епоксикомпозитів, наповнених нанотрубками. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2014. № 2 (11). С. 197–202.
6. Мишак В. Д., Семиног В. В., Гомза Ю. П. та ін. Епоксидні наноккомпозити. Структура та властивості. *Полімерн. журнал*. 2008. Т. 30. № 2. С. 144–151.
7. Букетов А. В., Сапронов О. О. Дослідження залежності властивостей епоксидних композитів від вмісту дисперсних наповнювачів з метою формування захисних покриттів для підйомно-транспортних механізмів. *Підйомно-транспортна техніка*. 2013. № 3 (39). С. 92–107.
8. Михайлин Ю. А. Специальные полимерные композиционные материалы. Санкт-Петербург : Научные основы и технологии, 2009. 660 с.
9. Buketov A. V., Saponov O. O., Brailo M. V., Aleksenko V. L. Influence of the ultrasonic treatment on the mechanical and thermal properties of epoxy nanocomposites. *Materials Science*. 2014. V. 49. N 5. P. 696–702.
10. Variation in the particle size of Fe–Ti–B₄C powders induced by high-voltage electrical discharge / Sizonenko O., Baglyuk G., Torpakov A. and other. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2012. Vol 51, Issue 3. P. 129–136.
11. Syzonenko O. Method of preparation of blend for aluminium matrix / O.Syzonenko, E.Shererii, S.Prokhorenko and other. Composites by high voltage electric discharge. *Machines. Technologies. Materials*. 2017. Vol. 11, Issue 4. P. 171–173.
12. Двухкомпонентное, устойчивое к абразивному износу эпоксидное покрытие, пигментированное алюминием, обеспечивающее превосходную длительную защиту от коррозии : технические условия на продукт. URL : https://international.brand.akzonobel.com/m/150ad14b3d9565b4/original/Intershield_300_rus_A4_20151012.pdf
13. 15360. 15360; 15380; 38602. 1,2 эпоксидное покрытие : технический паспорт на продукт. Jotacote Universal № 10. URL : https://www.jotun.com/Datasheets/Download?url=%2FTDS%2FTDS__15360__Jotacote+Universal+N10__Rus__RU.pdf

REFERENCES

1. *Polimerniye kompozicionniye materialih: prochnostj i tekhnologiya* / S. L. Bazhenov [i dr.]. Dolgoprudnihyj : Intellekt. 2010. 352 s.
2. Chvalun S. N. Polimerniye nanokompozitih. *Priroda*. 2000. №7 (86) S. 22–30.
3. F. Caruso. Nanoengineering of Particle Surfaces. *Adv. Mater.* 2001. № 1. 13. P. 11–22.
4. Amelin M. Yu. Zabezpechennia nadiinosti transportnykh zasobiv u konteksti vykorystannia zakhysnykh polimernykh nanokompozytnykh pokryttiv. *Naukovi notatky*. Lutsk : LNTU. 2018. Vypusk 63. S. 14–21.

5. Sapronov O. O., Rozhkov O. S., Leshchenko O. V., Holotenko O. S. Doslidzhennia adheziinykh i fizyko-mekhanichnykh vlastyvostei epoksykompozytiv, napovnenykh nanotrubbkamy. *Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii*. 2014. # 2 (11). S. 197–202.
6. Myshak V. D., Semynoh V. V., Homza Yu. P. ta in. Epoksydni nanokompozyty. Struktura ta vlastyvosti. *Polimern. zhurnal*. 2008. T. 30. # 2. S. 144–151.
7. Buketov A. V., Sapronov O. O. Doslidzhennia zalezhnosti vlastyvostei epoksydnykh kompozytiv vid vmistu dyspersnykh napovniuvachiv z metoiu formuvannia zakhysnykh pokryttiv dlia pidiomno-transportnykh mekhanizmiv. *Pidiomno-transportna tekhnika*. 2013. # 3 (39). S. 92–107.
8. Mikhayjlin Yu. A. *Specialjnihe polimernihe kompozicionnihe materialih*. Sankt-Peterburg : Nauchnihe osnovih i tekhnologii, 2009. 660 s.
9. Buketov A. V., Sapronov O. O., Brailo M. V., Aleksenko V. L. Influence of the ultrasonic treatment on the mechanical and thermal properties of epoxy nanocomposites. *Materials Science*. 2014. V. 49. N 5. P. 696–702.
10. Variation in the particle size of Fe–Ti–B₄C powders induced by high-voltage electrical discharge / Sizonenko O., Baglyuk G., Torpakov A. and other. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2012. Vol 51, Issue 3. P. 129–136.
11. Syzonenko O. Method of preparation of blend for aluminium matrix / O.Syzonenko, E.Shererii, S.Prokhorenko and other. Composites by high voltage electric discharge. *Machines. Technologies. Materials*. 2017. Vol. 11, Issue 4. P. 171–173.
12. Dvukhkomponentnoe, ustoyjchivoe k abrazivnomu iznosu ehpoksidnoe pokrihtie, pigmentirovannoe alyuminiem, obespechivayuthee prevoskhodnuyu dliteljnyuyu zathitu ot korrozii : tekhnicheskije usloviya na produkt. URL : https://international.brand.akzonobel.com/m/150ad14b3d9565b4/original/Intershield_300_rus_A_4_20151012.pdf
13. 15360. 15360; 15380; 38602. 1,2 ehpoksidnoe pokrihtie : tekhnicheskijj pasport na produkt. Jotacote Universal № 10. URL : https://www.jotun.com/Datasheets/Download?url=%2FTDS%2FTDS__15360__Jotacote+Universal+N10__Rus__RU.pdf

Чернявская Т. В. МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА РАБОТЫ ОБОРУДОВАНИЯ РЕЧНОГО И МОРСКОГО ТРАНСПОРТА ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЗАЩИТНЫХ АНТИКОРРОЗИОННЫХ ПОКРЫТИЙ

Статья посвящена решению научно-технической задачи, которая заключается в повышении ресурса работы оборудования речного и морского транспорта за счет использования разработанных полимерных композитных модифицированных антикоррозионных защитных покрытий. Решение научно-технической задачи заключается в разработке метода направленного управления процессами взаимодействия между компонентами эпоксидного полимера, что позволило создать новый класс композитных материалов и покрытий на их основе с высокими показателями эксплуатационных характеристик, предназначенных для восстановления средств водного транспорта.

Установлены новые закономерности повышения ресурса и коррозионной стойкости средств транспорта за счет формирования покрытий, содержащих в комплексе модификатор фталимид (0,25 масс.ч.) и синтезированную железо-карбидную шихту (0,2... 0,5 масс.ч.) на 100 масс.ч. эпоксидного олигомера ЭД-20, что позволяет при их введении в полимер при оптимальном содержании получать материалы с улучшенными когезионными свойствами за счет значительной удельной площади поверхности дисперсных добавок и повышенной их активности в межфазном взаимодействии.

Впервые разработана технологическая схема формирования покрытий, благодаря которой достигнуто синергетический эффект в повышении ресурса работы оборудования речного и морского транспорта и улучшении антикоррозионных свойств защитных покрытий в результате комплексного воздействия модификатора фталимида, микродисперсных наполнителей в виде синтезированной железо-карбидной шихты и фитиновой кислоты. Методом ИК-спектроскопии обоснованно увеличение степени сшивания трехмерной сетки полимера, что обеспечивает улучшение свойств композитов. Это обусловлено тем, что на поверхности частиц после синтеза локализуются участки карбидов титана и железа, которые в основном и являются активаторами

создания физических и химических межфазовых связей при структурообразовании антикоррозионных покрытий.

Ключевые слова: матрица, эпоксидный композит, модификатор, наполнитель, свойства, антикоррозийное покрытие.

Cherniavska T. V. THE METHOD OF INCREASING THE SERVICE LIFE OF RIVER AND SEA TRANSPORT EQUIPMENT THROUGH THE USE OF MODIFIED PROTECTIVE ANTI-CORROSION COATINGS

The article is devoted to solving a scientific and technical problem, which consists in increasing the service life of equipment for river and sea transport through the use of developed polymer composite modified anti-corrosion protective coatings. The solution to the scientific and technical problem consists in the development of a method for directed control of the processes of interaction between the components of the epoxy polymer, which made it possible to create a new class of composite materials and coatings based on them with high performance characteristics, intended for the restoration of water transport vehicles.

New regularities have been established for increasing the resource and corrosion resistance of transport vehicles due to the formation of coatings containing in the complex the modifier phthalimide (0.25 mass %) and the synthesized iron-carbide charge (0.2 ... 0.5 mass %) per 100 mass.% epoxy oligomer ED-20, which makes it possible to obtain materials with improved cohesive properties due to the significant specific surface area of dispersed additives and their increased activity in interfacial interaction when they are introduced into the polymer at an optimal content.

For the first time, a technological scheme for the formation of coatings was developed, thanks to which a synergistic effect was achieved in increasing the service life of river and sea transport equipment and improving the anticorrosive properties of protective coatings as a result of the complex action of the phthalimide modifier, microdispersed fillers in the form of synthesized iron-carbide charge and phytic acid. The method of IR spectroscopy justifies an increase in the degree of crosslinking of a three-dimensional polymer network, which provides an improvement in the properties of composites. This is due to the fact that on the surface of the particles after synthesis are localized areas of titanium and iron carbides, which are mainly activators of the creation of physical and chemical interphase bonds during the structure formation of anticorrosive coatings.

Key words: matrix, epoxy composite, modifier, filler, properties, anti-corrosion coating.

© Чернявська Т.В.

Статтю прийнято
до редакції 26.08.20

ІНЖЕНЕРІЯ У ТРАНСПОРТНІЙ ГАЛУЗІ

КЛАСИФІКАЦІЙНІ ОЗНАКИ НЕНАСЕЛЕНИХ ПРИВ'ЯЗНИХ ПІДВОДНИХ СИСТЕМ ЯК СКЛАДОВА ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЇХ ПРОЄКТУВАННЯ

Блінцов В. С., д.т.н., професор, проректор з наукової роботи Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова (м. Миколаїв), e-mail: volodymyr.blintsov@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0002-3912-2174;

Клочков О. П., старший викладач Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова (м. Миколаїв), e-mail: oleksandr.klockov@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0002-6426-3374;

Куценко П. С., молодший науковий співробітник Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова (м. Миколаїв), e-mail: arcadia.blacksea@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0576-0503

Стадія проектування є досить ресурсомісткою у загальному процесі створення засобів морської робототехніки. Тому актуальною є прикладна наукова задача зниження ресурсних витрат таких процесів, зокрема й завдяки скороченню витрат часу на виконання проєктних робіт шляхом визначення проєктних характеристик уже на ранніх стадіях проектування.

Запропонований підхід до зниження таких витрат передбачає структурування класифікаційних ознак прив'язаних підводних систем таким чином, щоб максимально спростити вибір та обґрунтування проєктних рішень на стадії ескізного проектування. Для проєктувальників підводної техніки запропоновано перелік класифікаційних ознак прив'язаних самохідних і буксируваних підводних систем, який ґрунтується на системному підході і структурований відповідно до матеріальних, енергетичних, інформаційних та експлуатаційних (функціональних) критеріїв. Це дає змогу виконувати порівняльну оцінку наявних систем за ключовими показниками та формалізувати процеси їх синтезу на ранніх стадіях проектування.

Для демонстрації можливостей системного підходу розроблено узагальнений алгоритм організації проєктних робіт із застосуванням запропонованої системи класифікаційних ознак прив'язаних самохідних і буксируваних підводних систем на ранніх стадіях їх проектування. Алгоритм передбачає формування та структурування множини класифікаційних ознак таких систем як первинний етап процесу прийняття ефективних конструкторських рішень на ранніх стадіях проектування засобів підводної робототехніки.

Показано, що використання запропонованих класифікаційних ознак дає змогу з мінімальними витратами проєктних ресурсів звернутися до відповідних баз даних і вибрати раніше створені артефактні проєкти та обрати доступні на ринку підводної техніки вузли і деталі підводних систем, які задовольняють вимоги технічного завдання на створення прив'язаних підводних систем. Це суттєво знижує собівартість проєктних робіт і підвищує конкурентоздатність вітчизняних наукоємних розробок на ринках морської робототехніки.

***Ключові слова:** прив'язна підводна система, проектування, системний підхід, класифікаційні ознаки.*

DOI: 10.33815/2313-4763.2020.1.22.086-098

Постановка задачі у загальному вигляді. Прив'язні підводні системи (ППС, самохідні – СППС та буксировані – БПС) належать до високоефективних засобів морської робототехніки і широко використовуються у морській практиці. Проектування та побудова ППС належать до актуальних та наукоємних прикладних завдань вітчизняного морського приладобудування [1].

До складу типової ППС входять: прив'язний самохідний (СППА, в англійській літературі – remotely operated vehicle) чи буксирований (БПА, towed underwater vehicle) підводний апарат, який за допомогою кабель-троса (КТ, tether cable) чи, відповідно, кабель-буксира (КБ, towed cable) з'єднаний з постом енергетики та керування (ПЕК, power control system), який розміщується на населеному чи безекіпажному надводному судні-носії (СН). Зазначимо, що ПЕК забезпечує керування ППС в усіх режимах його просторового руху та в усіх технологічних режимах за призначенням.

Опускання СППА на воду (початкова фаза підводної роботи) та його підйом на палубу СН (завершальна фаза підводної роботи) виконуються за допомогою суднового

спуско-піднімального пристрою (СПП, в англійській літературі – cargo device). Для зберігання КТ у міжопераційний період та для керованої зміни довжини його попущеної частини під час виконання підводних робіт на СН розміщують також кабельну лебідку (КЛ, в англійській літературі – cable winch), рис. 1.

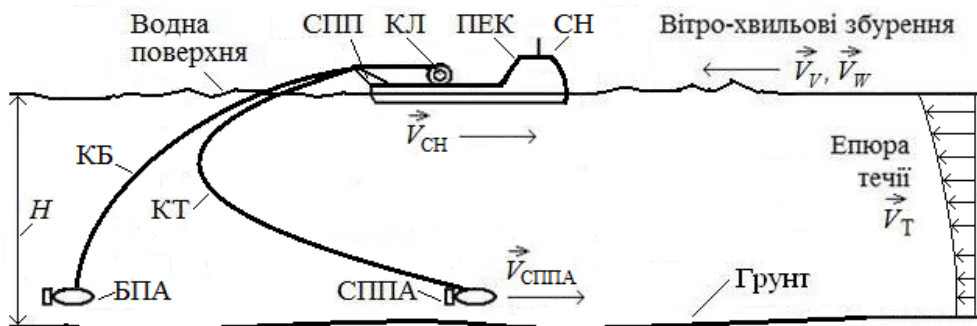


Рисунок 1 – Склад обладнання типового СППК

Сучасні вимоги до створення засобів морської робототехніки вимагають скорочення загальних термінів їх створення і, одночасно, забезпечення їх високих експлуатаційних характеристик. Це зумовлено необхідністю забезпечення високої конкурентоспроможності створюваної техніки як на внутрішньому, так і на зовнішньому ринках морської техніки [2].

Одним з перспективних шляхів забезпечення зростаючих вимог ринку є скорочення витрат часу на проектування ППС, зокрема, пошук ефективних проектних рішень уже на ранніх стадіях проектування – дослідницького та ескізного проектування. Останні дослідження, виконані у цьому напрямі, свідчать, що теоретичною основою для пошуку таких рішень може бути системний підхід, характерною особливістю якого є структуризація проектних завдань за чотирма основними напрямками, що оцінюються за матеріальними, енергетичними, інформаційними та експлуатаційними (функціональними) критеріями [3]. Це дає змогу суттєво зменшити витрати ресурсів (часу, вартості тощо) шляхом отримання прийнятних з позицій технічного завдання (ТЗ) проектних рішень уже на ранніх стадіях проектування.

Структуризація проектних завдань з метою застосування вказаних критеріїв системного підходу може бути виконана на основі характерних класифікаційних ознак ППС, що суттєво б спростило як пошук артефактних (раніше вже створених і реалізованих) проектних рішень окремих складових ППС, так і розробку нових проектно-конструкторських рішень на основі застосування сучасних наукових результатів.

Отже, уточнення класифікаційних ознак ППС з метою їх максимального наближення до вимог проектної практики є актуальним прикладним науковим завданням, успішний розв’язок якого має підвищити загальну ефективність процесів проектування ППС.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У зв’язку з тим, що засоби морської робототехніки взагалі, і ППС зокрема, відносяться до надзвичайно активно розроблюваних практично усіма морськими країнами світу, питання їх класифікації відповідно не усталені. Однак можна констатувати, що за деякими ознаками така класифікація вже носить усталений характер.

Так, згідно з усталеною міжнародною практикою [4, 5] за класифікаційними ознаками підводні апарати, у цілому, і підводні апарати для ППС зокрема, поділяються на:

- населені (manned, M) і ненаселені (unmanned, U);
- автономні (free, F) прив’язні (tethered, T);
- плаваючі (suspended, S) і донні (bottomed, B);
- самохідні (propelled, P) і несамохідні (inert, I).

Крім того, сучасні ППС можуть бути виконані за комбінованою схемою побудови (класифікаційна ознака – combined, C), коли до їх складу можуть входити ненаселені самохідні підводні апарати, що на певних етапах підводної місії можуть буксируватися.

У вітчизняній практиці класифікація ППС виконується також за ознаками призначення та структури просторової конфігурації ППС, а також за робочою глибиною застосування [6].

За призначенням ППС поділяють на:

- пошукові $Пп$, призначені для пошуку затонулих об'єктів – суден, авіа- та космічної техніки тощо;
- геологорозвідувальні $Пг$, призначені для пошуку корисних копалин на шельфі;
- рибпромислові $Пр$, призначені для виявлення промислово значимих рибних запасів та їх вилову за допомогою тралів;
- науково-дослідницькі $Пн$, призначені для вивчення Світового океану (дослідження процесів розвитку іхтіофлори та іхтіофауни, донних відкладень), вирішення задач підводної археології та екології моря;
- воєнні $Пв$, призначені для пошуку, класифікації та знищення морських мін тощо.

За структурою просторової конфігурації С ППС поділяються на:

- одноланкові $Сo$, які містять один СППА або БПА; такі ППС є найбільш поширеними через їхню простоту побудови й експлуатації;
- багатоланкові $Сб$, до складу яких входять декілька СППА чи БПА або буксируваних пошукових приладів (БПП).

До багатоланкових ППС з підвищеними показниками продуктивності відноситься також новий тип БПС зі змінною кількістю ланок; такі системи мають у своєму складі буксируваний привантажувач (П) і приєднаний до нього за допомогою кабель-буксира (КБ2) та дистанційно керованого замкового пристрою (З) СППА і дають змогу на великій швидкості буксирування обстежувати значні площі донної поверхні за допомогою пошукових приладів (корисного вантажу КВ на борту буксируваного СППА), а при виявленні підводної цілі детально обстежувати її шляхом тимчасового від'єднання СППА від привантажувача без зниження швидкості v_b руху СН у цілому.

За робочою глибиною $Г$ ППС, як і інші підводні апарати і системи, поділяють на: ППС для малих глибин $Г_{600}$ (до 600 м); ППС для середніх глибин $Г_{2000}$ (до 2000 м); ППС для великих глибин $Г_{6000}$ (до 6000 м); ППС для надвеликих глибин $Г_{Max}$ (більше 6000 м).

За останні роки у діяльності вітчизняних цивільних організацій та силових структур спостерігається тенденція щодо збільшення пошукових та спеціальних робіт на водолазних глибинах (до 60 м), тому автори вважають за доцільне виділити окремий підклас ППС для мілководних акваторій $Г_{100}$ (до 100 м).

Наведені вище підходи до класифікації ППС є важливими насамперед для замовників такої техніки, оскільки дають змогу оцінити сферу їх застосування. Однак вони не містять інформацію про конструкторські рішення, закладені у їх технічну реалізацію.

Це не дає змоги визначити особливості побудови нових зразків підводної робототехніки та виконати порівняльний аналіз проектних рішень.

Виділення невирішених раніше частин загальної задачі. Проектні завдання створення нових конкурентоспроможних засобів підводної робототехніки можуть бути ефективно вирішені шляхом оперативного поєднання інформації про артефактні проектні рішення окремих складових ППС, які можна залучити до конкретного проекту, з інформацією про необхідні прикладні пошукові дослідження і розробки, які необхідно додатково провести для виконання вимог ТЗ на створення нової техніки. Таку інформацію проектувальник може отримати із застосуванням узагальненої методики проектування безекіпажних ППС на основі системного підходу [7].

Проте для ефективного її застосування доцільним є приведення класифікаційних ознак створюваної ППС до вимог системного підходу, тобто, виконати структурування класифікаційних вимог відповідно до системи матеріальних, енергетичних, інформаційних та експлуатаційних (функціональних) критеріїв.

Мета дослідження – подальший розвиток системи класифікаційних ознак ППС шляхом їх приведення у відповідність до матеріальних, енергетичних, інформаційних та

експлуатаційних (функціональних) критеріїв, що утворить інформаційну основу для застосування системного підходу на ранніх стадіях проектування ППС.

Об'єктом дослідження є процес проектування ППС із самохідними телекерованими чи буксирними підводними апаратами на ранніх стадіях їх створення.

Предметом дослідження є формування та структуризація множини класифікаційних ознак ППС як складової процесу прийняття ефективних конструкторських рішень на ранніх стадіях їх проектування.

Методи дослідження – основи теорії множин, системний підхід в організації процесів створення засобів морської робототехніки.

Викладення основного матеріалу.

Застосування методології системного підходу до класифікації ППС. На основі виконаного вище аналізу наявних класифікаційних ознак ППС можна сформулювати наступні множини таких ознак:

- за призначенням P :

$$P = \{P_P; P_G; P_R; P_H; P_B\}; \quad (1)$$

- за структурою просторової конфігурації C :

$$C = \{C_O; C_B\}; \quad (2)$$

- за робочою глибиною G :

$$G = \{G_{100}; G_{600}; G_{2000}; G_{6000}; G_{Max}\}. \quad (3)$$

Автори пропонують більш узагальнену класифікацію ППС, яка ґрунтується на системному підході [8] та передбачає чотири системні групи класифікаційних ознак: функціональні Φ , енергетичні E , інформаційні I та конструктивні K .

Тоді класифікаційні ознаки можна представити у вигляді множини KO :

$$KO = \{\Phi; E; I; K\}. \quad (4)$$

До функціональних ознак Φ доцільно віднести, власне, всі наведені вище вітчизняні класифікаційні ознаки (P, C, G), оскільки вони характеризують експлуатаційні можливості ППС. З огляду на специфіку застосування буксирних ППС варто доповнити вказані ознаки (1)-(3) суттєвою для проектувальників БПС ознакою B «схема буксування», за якою вирізняти БПС:

- приповерхневого буксування БПА B_{PB} за класичною схемою – СН буксирує БПА або пошукові прилади (БПП) по поверхні моря; зазвичай, у такий спосіб буксирують пошукову гідроакустичну апаратуру при пошуку підводних родовищ нафти і газу [9];

- приповерхневого «зворотного» буксування БПА B_{PZ} , коли підводне СН (зазвичай, автономний підводний апарат у підводному положенні) буксирує БПА-радіобуй під поверхнею моря для організації оперативного радіо-, відео- та/чи супутникового зв'язку з базою в on-line режимі без спливання на поверхню моря [10];

- глибинного буксування B_{GB} (СН буксирує БПА у товщі води); така схема буксування застосовується при виконанні наукових досліджень, а також при підводних пошукових роботах [11];

- придонного буксування B_{DB} (СН буксирує БПА у безпосередній близькості до донної поверхні); буксування застосовується при виконанні пошукових і аварійно-рятувальних робіт, при проведенні підводних наукових досліджень [12].

Отже, для буксирних ППС додаткова множина класифікаційних ознак за схемою буксування B містить складові:

$$B = \{B_{PB}; B_{PZ}; B_{GB}; B_{DB}\}. \quad (5)$$

Тоді множина Φ функціональних ознак ППС буде мати наступні складові:

$$\Phi = \{P; C; G; B\}. \quad (6)$$

До енергетичних ознак E , які мають створювані ППС, доцільно віднести наступні:

E_{Kab} – живлення СППС (БПА) забезпечується через КТ чи КБ від СН;

E_A – живлення СППС (БПА) забезпечується джерелами живлення, розташованими на борту БПА (зазвичай, це – акумуляторні батареї);

E_{KabA} – живлення СППС (БПА) забезпечується за змішаною схемою, коли одна частина споживачів електроенергії підводного апарата живиться від бортових акумуляторних батарей (наприклад, системи навігації та керування), а інші – від джерела енергії СН через КТ чи КБ (наприклад, підсистеми електрообладнання корисного вантажу, потужні гідроакустичні прилади тощо).

Тоді множина E енергетичних ознак ППС буде мати наступні складові:

$$E = \{E_{Kab}; E_A; E_{KabA}\}. \quad (7)$$

Важливою складовою класифікаційних ознак сучасних ППС є *інформаційні ознаки* I , які характеризують рівень автоматизації ППС:

– при підготовці до роботи I_P (наприклад, автоматичне тестування обладнання перед початком місії) та після її завершення I_Z ;

– при виконанні підводної місії I_M (наприклад, ручне керування ППС I_{M-P} , автоматизоване керування I_{M-A} , автоматичне керування I_{M-AA} , інтелектуальне керування I_{M-I} , групове керування декількома СППС (БПА) або ППС I_{M-Gr}).

Іншою складовою інформаційної ознаки I є рівень інформатизації процесів, які мають місце при застосуванні ППС за призначенням – наявність та вид інформаційного обміну між підводним апаратом та ПЕК $I_{ПА-ПЕК}$ або між підводним апаратом та іншими підводними системами $I_{ПА-ПС}$ (наприклад, автономними підводними апаратами чи донними станціями). Зазвичай, це зв'язок через КТ чи КБ ($I_{ПА-ПЕК-К}$), гідроакустичний ($I_{ПА-ПЕК-ГАКС}$, $I_{ПА-ПС-ГАКС}$) або оптичний ($I_{ПА-ПЕК-О}$, $I_{ПА-ПС-О}$) канали зв'язку.

Тоді множина I інформаційних ознак ППС буде мати наступні складові:

$$I = \{I_P; I_Z; I_{M-P}; I_{M-A}; I_{M-AA}; I_{M-I}; I_{M-Gr}; I_{ПА-ПЕК-К}; I_{ПА-ПЕК-ГАКС}; I_{ПА-ПС-ГАКС}; I_{ПА-ПЕК-О}; I_{ПА-ПС-О}\}. \quad (8)$$

Зазначимо, що у загальному випадку автоматизації підлягають усі складові ППС:

– пристрій доставки СППА чи БПА на воду та прийому з води (на надводних суднах та кораблях – це автоматичний СПП, на підводному апараті чи гелікоптері – дистанційно керовані ангари з автоматичними КЛ для випускання і прийому СППА чи БПА [13]);

– кабельні лебідки для автоматичного завдання довжини попущеної частини КТ чи КБ при усталеному русі підводного апарата та керованої зміни довжини КТ чи КБ у перехідних режимах експлуатації ППС;

– виконавчі механізми власне СППА чи БПА – електрорушійні пристрої СППА, приводи повороту несучих поверхонь, елеронів (елевонів) і хвостового оперення, рушії позиціонування БПА тощо [14];

– виконавчі механізми корисного вантажу, встановленого на СППА чи БПА – фото-, відео- і гідроакустичної апаратури, відбірників проб води і ґрунту тощо [15].

Розглянемо тепер *конструктивні ознаки* K класифікації ППС. До них, насамперед, віднесемо:

– склад обладнання ППС $K_{Обл}$ (базова комплектація $K_{Обл-Б}$, повна комплектація $K_{Обл-П}$, авіаційного $K_{Обл-Авіа}$ та підводного $K_{Обл-Підв}$ застосування);

– конструктивні рішення складових ППС – архітектурно-конструктивний тип СППА чи БПА $K_{ПА}$, конструктивні рішення щодо КЛ $K_{КЛ}$, КТ чи КБ $K_{К}$, СПП $K_{СПП}$ та ПЕК $K_{ПЕК}$;

– характеристики механічної автономності підводного апарата $K_{МА}$ (тільки

буксирований $K_{БПА}$, тільки телекерований самохідний $K_{СППА}$, з можливістю переходу БПА до режиму телекерованого $K_{БПА-СППА}$ чи до режиму самохідного автономного підводного апарата $K_{БПА-АПА}$, а також з можливістю переходу СППА до режиму самохідного автономного підводного апарата $K_{СППА-АПА}$);

- масогабаритні характеристики обладнання ППС $K_{МГХ}$.

Тоді множина K конструктивних ознак ППС буде мати наступні складові:

$$K = \{K_{Обл-Б}; K_{Обл-П}; K_{Обл-Авіа}; K_{Обл-Підв}; K_{ПА}; K_{КЛ}; K_{К}; K_{СПП}; K_{ПЕК}; K_{Б}; K_{РОВ}; K_{АУВ}; K_{МГХ}\}. \quad (9)$$

Нижче наведемо основні класифікаційні ознаки для окремих складових ППС.

Формування і структуризація множини класифікаційних ознак складових ППС. *Класифікаційні ознаки СППА.* З позицій системного підходу (4) можна запропонувати наступні класифікаційні ознаки БПА:

- функціональні ознаки $\Phi_{СППА}$ – за призначенням $\Phi_{СППА-П}$, за структурою просторової конфігурації $\Phi_{СППА-С}$ та за робочою глибиною $\Phi_{СППА-Г}$ згідно (6);
- енергетичні ознаки $E_{СППА}$ – з електроживленням від СН $E_{СППА-СН}$, від власних бортових джерел енергії $E_{СППА-А}$ та комбінованого живлення $E_{СППА-СН-А}$, згідно (7);
- інформаційні ознаки $I_{СППА}$ – за рівнями автоматизації процесів інформаційного обміну та керування СППА $I_{СППА-П}$, $I_{СППА-М}$, $I_{СППА-З}$, $I_{СППА-ПЕК}$, $I_{СППА-ПС}$, згідно (8);
- конструктивні ознаки $K_{СППА}$ – склад обладнання $K_{СППА-Обл}$ та архітектурно-конструктивний тип СППА (торпедоподібної форми $K_{СППА-Т}$, у формі паралелепіпеда $K_{СППА-П}$ тощо), згідно (9).

Класифікаційні ознаки БПА. З позицій системного підходу (4) можна запропонувати наступні класифікаційні ознаки БПА, які збігаються з ознаками СППА:

- функціональні ознаки $\Phi_{БПА}$ – за призначенням $\Phi_{БПА-П}$, за структурою просторової конфігурації $\Phi_{БПА-С}$, за схемою буксирування $\Phi_{БПА-Б}$ та глибиною $\Phi_{БПА-Г}$ згідно (6);
- енергетичні ознаки $E_{БПА}$ – з електроживленням від СН $E_{БПА-СН}$, від власних бортових джерел енергії $E_{БПА-А}$ та комбінованого живлення $E_{БПА-СН-А}$, згідно (7);
- інформаційні ознаки $I_{БПА}$ – за рівнями автоматизації процесів інформаційного обміну та керування БПА $I_{БПА-П}$, $I_{БПА-З}$, $I_{БПА-М}$, $I_{БПА-ПЕК}$, $I_{БПА-ПС}$, згідно (8);
- конструктивні ознаки $K_{БПА}$ – склад обладнання $K_{БПА-Обл}$ та архітектурно-конструктивний тип БПА $K_{БПА}$ («планер» $K_{БПА-П}$, «літаюче крило» $K_{БПА-ЛК}$, «ротор Флеттнера» тощо), згідно (9).

Класифікаційні ознаки КТ і КБ. З позицій системного підходу (4) можна запропонувати наступні класифікаційні ознаки КТ та КБ:

- функціональні ознаки $\Phi_{КТ}$, $\Phi_{КБ}$ – за призначенням $\Phi_{КТ-П}$, $\Phi_{КБ-П}$ (вантажні функції, передача електроенергії та/або інформації) та за робочою глибиною, згідно (6);
- енергетичні ознаки $E_{КТ}$, $E_{КБ}$ – максимальна потужність, що передається, $E_{КТ-П}$, $E_{КБ-П}$ та втрати потужності $E_{КТ-ВП}$, $E_{КБ-ВП}$, максимальна електрична напруга живлення БПА $E_{КТ-Н}$, $E_{КБ-Н}$ та падіння напруги на КБ $E_{КТ-ПН}$, $E_{КБ-ПН}$, згідно (7);
- інформаційні ознаки $I_{КТ}$, $I_{КБ}$ – пропускна здатність інформації КБ $I_{КТ-ПЗ}$, $I_{КБ-ПЗ}$, завадостійкість інформаційних каналів $I_{КТ-ЗС}$, $I_{КБ-ЗС}$, згідно (8);
- конструктивні ознаки, відповідно, $K_{КТ}$ і $K_{КБ}$ – конструкція (оболонки, сердечника) $K_{КТ-К}$, $K_{КБ-К}$, мінімальний радіус згину $K_{КТ-РЗ}$, $K_{КБ-РЗ}$, характеристики плавучості $K_{КТ-Пл}$, $K_{КБ-Пл}$ та гідродинамічні характеристики КБ $K_{КТ-ГДХ}$, $K_{КБ-ГДХ}$ тощо, згідно (9).

Класифікаційні ознаки КЛ. Кабельні лебідки БПС являють собою електрифіковані пристрої морського застосування, які забезпечують оперативну керувану зміну довжини попущеної частини кабель-троса залежно від режиму роботи ППА, а також зберігання КБ у міжопераційний період.

Кабельні лебідки ППС класифікують за такими ознаками:

- за розміщенням – на палубі СН та під водою (на підводному апараті-носії);
- за типом привода – на електричні та гідравлічні;
- за рівнем автоматизації – на ручні, автоматизовані та автоматичні.

Рівень автоматизації КЛ розглядається у трьох аспектах:

- як шлях розвантаження операторів БПС від напруженої тривалої праці та недопущення помилок у керуванні, зумовлених людським фактором;
- як засіб компенсації (пасивної чи активної) збурюючі сили гідродинамічної природи, які виникають на БК під час буксирування;
- як єдино можливе технічне рішення при дистанційному керуванні КЛ як підводним обладнанням (наприклад, у складі БПС підводного апарата-носія чи безекіпажного СН).

З позицій системного підходу (4) можна запропонувати наступні класифікаційні ознаки КЛ:

- функціональні ознаки $\Phi_{КЛ}$ – за призначенням $\Phi_{КЛ-П}$ (суднові $\Phi_{КЛ-ПС}$, авіаційні $\Phi_{КЛ-ПА}$, підводні $\Phi_{КЛ-ПП}$) згідно (6);
- енергетичні ознаки $E_{КЛ}$ – споживана потужність $E_{КЛ-П}$, енергоживлення від мережі СН $E_{КЛ-СН}$ чи від автономного джерела енергії (зазвичай, акумулятора) $E_{КЛ-А}$, згідно (7);
- інформаційні ознаки $I_{КЛ}$ – за типом системи керування (ручне керування $I_{КЛ-Р}$, автоматизоване $I_{КЛ-А}$, коли частина режимів КЛ виконується в автоматичному режимі, та автоматичне $I_{КЛ-АА}$, коли всі режими роботи КЛ виконуються в автоматичному режимі, згідно (8);
- конструктивні ознаки $K_{КЛ}$ – за типом установки на СН (стаціонарні $K_{КЛ-С}$, що закріплюються на палубі $K_{КЛ-С-П}$, на вертикальній переборці $K_{КЛ-С-В}$ та на стелі $K_{КЛ-С-С}$) і мобільні $K_{КЛ-Моб}$ (на візках, що пересуваються палубою, або підвісними шляхами); за кількістю барабанів $K_{КЛ-Б}$ – на одnobарабанні $K_{КЛ-Б-1}$ та двобарабанні $K_{КЛ-Б-2}$ (останні, зазвичай, використовують подвійне перемотування КТ чи КБ для усунення з конструкції високовартісних струмопереходів); за типом кабельного барабана $K_{КЛ-ТБ}$ (нарізні $K_{КЛ-ТБ-Н}$, гладкі $K_{КЛ-ТБ-Г}$ і фрикційні $K_{КЛ-ТБ-Ф}$), згідно (9).

Класифікаційні ознаки СПП. Спуско-піднімальні пристрої (СПП) призначені для виконання палубних операцій з БПА – його спуском на воду перед початком підводної місії та підйом на палубу СН після завершення місії.

СПП класифікують за такими ознаками [13]:

- за базовою конструкцією – кранові, рамні, нахилені та шарнірні (маніпуляторні);
- за розміщенням – на палубі СН, під водою (на ПЧ) та авіаційні (на гелікоптері);
- за типом привода – на електричні та гідравлічні;
- за рівнем автоматизації – на ручні, автоматизовані та автоматичні.

Тому з позицій системного підходу (4) можна запропонувати наступні класифікаційні ознаки СПП:

- функціональні ознаки $\Phi_{СПП}$ – за призначенням $\Phi_{СПП-П}$ (суднові $\Phi_{КЛ-ПС}$, авіаційні $\Phi_{СПП-ПА}$, підводні $\Phi_{СПП-ПП}$) згідно (6);
- енергетичні ознаки $E_{СПП}$ – споживана потужність $E_{СПП-П}$, енергоживлення від мережі СН $E_{СПП-СН}$ чи від автономного джерела енергії (зазвичай, акумулятора) $E_{СПП-А}$, згідно (7);
- інформаційні ознаки $I_{СПП}$ – за типом системи керування (ручне керування $I_{СПП-Р}$, автоматизоване $I_{СПП-А}$, коли частина режимів СПП виконується в автоматичному режимі, та автоматичне $I_{СПП-АА}$, коли всі режими роботи СПП виконуються в автоматичному режимі, згідно (8);
- конструктивні ознаки $K_{СПП}$ – кранового типу $K_{СПП-К}$, рамного типу $K_{СПП-Р}$, нахилоного типу $K_{СПП-Н}$ та шарнірного типу $K_{СПП-Ш}$), згідно (9).

Класифікаційні ознаки ПЕК. Судновий пост енергетики та керування (ПЕК)

призначений для генерації усіх видів енергії, необхідних для роботи ППС, а також для керування роботою її складовими (СППА чи БПА, КЛ, СПП), прийому, аналізу та документування інформації, яка надходить з БПА.

Незважаючи на велике різноманіття варіантів побудови ПЕК для різних за призначенням БПС, можна виділити типові складові, характерні для цього виду техніки, які також можна описати у термінах системного підходу (4):

- функціональні ознаки $\Phi_{ПЕК}$ – за призначенням (суднові $\Phi_{ПЕК-С}$, авіаційні $\Phi_{ПЕК-А}$, підводні $\Phi_{ПЕК-П}$), згідно (6);
- енергетичні ознаки $E_{ПЕК}$ – енергоживлення від мережі СН $E_{ПЕК-СН}$ чи від автономного джерела енергії (зазвичай, акумулятора) $E_{ПЕК-А}$, згідно (7);
- інформаційні ознаки $I_{ПЕК}$ – за типом системи керування БПС $I_{ПЕК-СК}$ (ручне керування $I_{ПЕК-СК-Р}$, автоматизоване $I_{ПЕК-СК-А}$, коли частина режимів КЛ виконується в автоматичному режимі, та автоматичне $I_{ПЕК-СК-АА}$, коли всі режими роботи КЛ виконуються в автоматичному режимі, згідно (8);
- конструктивні ознаки $K_{ПЕК}$ – стаціонарні $K_{ПЕК-Ст}$ та мобільні $K_{ПЕК-Моб}$; останні призначені для використання в умовах відкритої палуби СН, згідно (9).

До складу типового ПЕК ППС входять: підвищувальний трансформатор живлення СППА чи БПА; щит електрокомутації; пульти пілота й оператора технологічного інструменту підводного апарата.

До складу пульта оператора підводного апарата, зазвичай, входять: кольорові відеомонітори; комп'ютери морського виконання; контролер системи інформаційного обміну СППА чи БПА; маніпулятори типу «джойстик» для керування просторовим положенням підводного апарата; джерело безперервного живлення; комутатор відеосигналів; панелі керування живленням підводного апарата, КЛ та СПП; джерело живлення СППА чи БПА.

Застосування запропонованої системи класифікаційних ознак ППС на ранніх стадіях їх проектування.

Описані вище класифікаційні ознаки ППС дають можливість оперативно обирати технічні рішення щодо створюваних підводних систем з наявної бази даних $БДАП$ артефактних проектів та створених на їх основі реальних ППС. Крім того, згідно [8], одним з результатів застосування запропонованих класифікаційних ознак можливим є визначення необхідності виконання додаткових проектних робіт у випадках, коли готових технічних рішень окремих складових ППС або їх вузлів не існує.

Узагальнений алгоритм організації проектних робіт із застосуванням запропонованої системи класифікаційних ознак ППС на ранніх стадіях їх проектування наведено на рис. 2.

Дамо опис окремих блоків алгоритму в порядку їх нумерації.

Блок 1 – аналіз вимог ТЗ на створення ППС та визначення ключових характеристик її складових ($П$, $С$, $Г$), необхідних для формування класифікаційних ознак створюваного засобу підводної техніки.

Блок 2 – формування класифікаційних ознак ППС та її складових згідно з вимогами системного підходу з використанням залежностей (4)-(9).

Блок Б3 – перевірка наявності артефактних проектів та ринково доступних деталей і вузлів ППС. Умова X_1 має наступні предикати:

x_{11} – звернення до бази даних $БДАП$ артефактних проектів ППС;

x_{12} – звернення до бази даних $БДДВ$ ринково доступних деталей та вузлів ППС;

x_{13} – перехід до блоків Б4 і Б5 для вибору, відповідно, раніше розроблених артефактних проектів ППС та ринково доступних деталей та вузлів ППС;

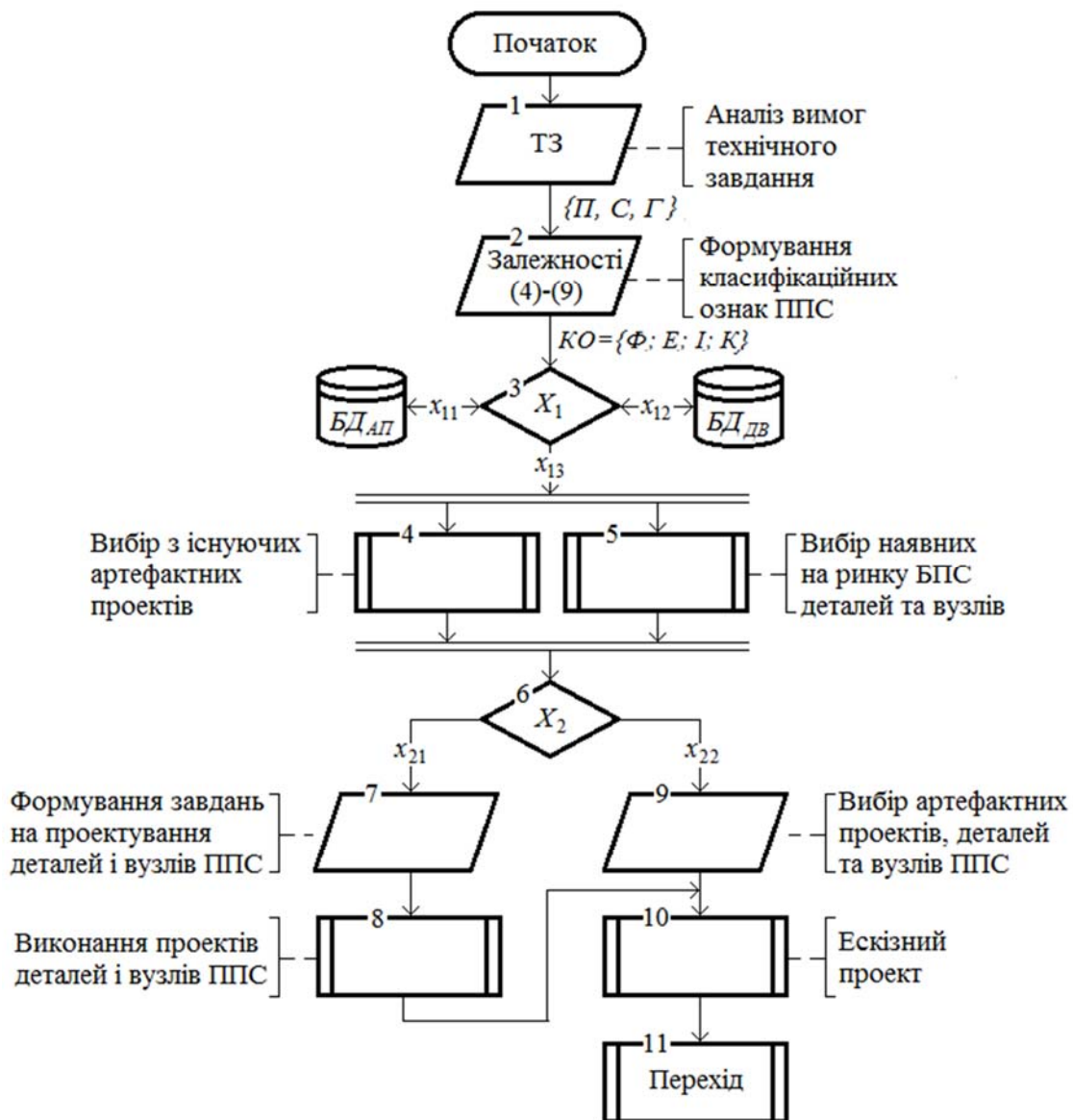


Рисунок 2 – Узагальнений алгоритм організації проектних робіт із застосуванням запропонованої системи класифікаційних ознак ППС на ранніх стадіях їх проектування

Блок Б6 – перевірка необхідності розробки та створення нових елементів та вузлів ППС. Умова X_2 має наступні предикати:

x_{21} – звернення до блоку Б7 формування завдань на проектування нових елементів і вузлів ППС, які відсутні в базах даних $БД_{АП}$ та $БД_{ДВ}$;

x_{22} – звернення до блоку Б9 вибору необхідних деталей та вузлів поточного проекту ППС, сформованих за умовою x_{12} з бази даних $БД_{ДВ}$.

Блок Б8 – виконання проектних робіт щодо створення оригінальних складових, елементів і вузлів поточного проекту ППС.

Б10 – виконання ескізного проекту ППС на основі використання як артефактних проектів та наявних на ринку деталей і вузлів ППС, так і з використанням запроєктованих та новостворених елементів і вузлів для елементів і вузлів поточного проекту ППС.

Попередні оцінки свідчать, що застосування запропонованої системи класифікаційних ознак (4) у проектній практиці дасть змогу скоротити витрати часу на підготовку попередніх проектних рішень для ескізного проекту ППС на 7–10%, що дасть змогу знизити загальні витрати проектних ресурсів, загальну собівартість і, тим самим, підвищити конкурентоздатність новостворюваних ППС на внутрішньому і зовнішньому ринках.

Висновки

1. Уперше з позицій системного підходу запропоновано перелік класифікаційних ознак для прив'язних самохідних і буксированих підводних систем, призначених для використання проєктувальниками засобів підводної робототехніки. Вказані групи ознак структуровані відповідно до матеріальних, енергетичних, інформаційних та експлуатаційних (функціональних) критеріїв, що дає змогу виконувати порівняльну оцінку наявних систем за ключовими показниками та формалізувати процеси їх синтезу на ранніх стадіях проєктування.

2. Розроблено узагальнений алгоритм організації проєктних робіт із застосуванням запропонованої системи класифікаційних ознак прив'язних самохідних і буксированих підводних систем на ранніх стадіях їх проєктування. Алгоритм передбачає формування та структурування множини класифікаційних ознак таких систем, як первинний етап процесу прийняття ефективних конструкторських рішень на ранніх стадіях проєктування засобів підводної робототехніки.

3. Запропоновані класифікаційні ознаки дають змогу з мінімальними витратами проєктних ресурсів за допомогою відповідних баз даних вибрати артефактні проєкти та доступні на ринку підводної техніки вузли і деталі підводних систем, що суттєво знижує собівартість проєктних робіт і підвищує конкурентоздатність вітчизняних наукоємних розробок.

4. Подальші дослідження планується проводити у напрямі створення прикладних проєктних методик використання розроблених класифікаційних ознак та розвитку баз даних артефактних проєктів та ринково доступних вузлів і деталей підводних систем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Створення універсальних транспортних суден і засобів океанотехніки: Монографія / С.С. Рижков, В.С. Блінцов, Г.В. Єгоров, Ю.Д. Жуков, В.Ф. Квасницький, К.В. Кошкін, І.В. Кривцун, В.О. Некрасов, В.В. Севрюков, Ю.В. Солоніченко; за ред. С.С. Рижкова. Миколаїв : Видавництво НУК, 2011. 340 с.

2. Управління успішними проєктами створення складної техніки : монографія / Г. В. Бабкін, В. С. Блінцов, Є. А. Дружинін, С. Г. Кійко, Н. Р. Книрик, К. В. Кошкін, Д. М. Крицький, С. С. Рижков, С. О. Слободян, Т. А. Фаріонова. Миколаїв : Видавництво Торубари В. В., 2017. 336 с.

3. Блінцов В. С., Клочков О. П. Рівняння існування самохідної прив'язної підводної системи як оцінка можливості її створення. *Підводні технології*. 2016. Вип. 3. С. 25–30.

4. Подводные технологии и средства освоения Мирового океана. Москва : Издательский дом «Оружие и технологии», 2011. 780 с.

5. Button, Robert W., John Kamp, Thomas B. Curtin, and James Dryden. A Survey of Missions for Unmanned Underwater Vehicles. Santa Monica, CA: RAND Corporation, 2009. URL : <https://www.rand.org/pubs/monographs/MG808.html>

6. Егоров, В. И. Подводные буксируемые системы : учебное пособие. Львів : Судостроение, 1981. 304 с.

7. Volodymyr Blintsov, Olexandr Klochkov. Generalized Method of Designing Unmanned Remotely Operated Complexes Based on the System Approach. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2019. Number 2. P. 43–51. DOI: 10.21303 / 2461-4262.2019.00878

8. Blintsov V., Kucenko P. Application of systems approach at early stages of designing unmanned towed underwater systems for shallow water areas. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. № 5/9 (101). P. 15–26. DOI: 10.15587 / 1729-4061.2019.179486

9. Буксирований профілограф EdgeTech 3100. URL : <http://www.tetis-pro.ru/catalog/edgetech-3100-buksiruemyy-profiflograf/>.

10. Авраменко П. Г., Буруніна Ж. Ю., Соколовський Г. П. Дослідження характеристик підйомного підводного апарата у дослідовому басейні. *Зб. наук. праць НУК*. Миколаїв : НУК, 2005. № 2. С. 32–39.
11. Воробйов Ю. Л., Баскаков С. М. Техніка освоєння континентального шельфу. Одеса : ОНМА, 2003. 107 с.
12. Лискин В. А., Зарецкий А. В., Римский-Корсаков Н. А. Разработка глубоководных буксируемых систем для исследования придонной области океана. *Научное обозрение. Технические науки*. 2019. № 1. С. 37–42. URL : <https://science-engineering.ru/ru/article/view?id=1229>.
13. Бугаенко Б. А. Динамика судовых спускоподъемных операций. Киев : Наукова думка, 2004. 320 с.
14. Siciliano Khatib. Handbook of Robotics. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2008. 1610 Pages. URL : https://books.google.com.ua/books?id=Xpgi5gSuBxsC&pg=PA1005&lpg=PA1005&dq=Underwater++ROV+Monographies&source=bl&ots=lvPkX4I71O&sig=ACfU3U3DChQbew2_BUMpJ8jUSNut_9IYPg&hl=uk&sa=X&ved=2ahUKewjt0KOD4snqAhUIx4sKHSZ4BQoQ6AEwAHoECAoQAQ#v=onepage&q=Underwater%20%20ROV%20Monographies&f=false
15. WHOI Towed Vehicle «CAMPER». URL : <http://www.whoi.edu/main/camper>

REFERENCES

1. Ryzhkov, S.S., Blintsov, V.S., Yehorov, H.V., Zhukov, Yu.D., Kvasnytskyi, V.F., Koshkin K.V., Solonichenko, Yu.V. (2011). *Stvorennia universalnykh transportnykh suden i zasobiv okeanotekhniki [Creation of universal transport vessels and means of ocean engineering]* : Monografiya. Mykolaiv: NUK. p. 340 [in Ukrainian]
2. Babkin, H.V., Blintsov, V.S., Druzhynin, Ye.A., Kijko, S.G., Knyrik, N. R., Koshkin, K.V., ... Farionova, T.A. (2017). *Upravlinnya uspishnymi proektamy stvorennia skladnoyi texniki: Monografiya*. Mykolayiv: Publisher Torubary V. V.
3. Blintsov, V.S., Klochkov, O.P., (2016). Rivnyannya isnuvannya samoxidnoyi pryvyaznoyi pidvodnoyi systemy yak ocinka mozhlyvosti yiyi stvorennia. *Zhurnal «Pidvodni texnologiyi»*, issue 3, pp. 25-30.
4. *Podvodnye tekhnologii i sredstva osvoeniya Mirovogo okeana*. (2011). M.: Izdatelskiy dom «Oruzhie i tekhnologii».
5. Button, Robert W., John Kamp, Thomas B. Curtin, and James Dryden. (2009). *A Survey of Missions for Unmanned Undersea Vehicles*. Santa Monica, CA: RAND Corporation. Retrieved from: <https://www.rand.org/pubs/monographs/MG808.html>
6. Yegorov, V. I. (1981). *Podvodnye buksiruemye sistemy.: Uchebnoe posobie*. L.: Sudostroenie.
7. Blintsov, V., Klochkov, O. (2019). Generalized Method of Designing Unmanned Remotely Operated Complexes Based on the System Approach – «EUREKA: Physics and Engineering», no 2, pp. 43-51. DOI: 10.21303 / 2461-4262.2019.00878
8. Blintsov, V., Kucenko, P. (2019). Application of systems approach at early stages of designing unmanned towed underwater systems for shallow water areas. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, no 5/9 (101), pp. 15-26. DOI: 10.15587 / 1729-4061.2019.179486
9. *Buksyruvaniy profilohraf EdgeTech 3100*. Retrieved from: <http://www.tetis-pro.ru/catalog/edgetech-3100-buksiruemyy-profilograf/>.
10. Avramenko, P.H., Burunina, Zh.Yu., Sokolovskyi, H.P. (2005). *Doslidzhennia kharakterystyk pidiomnoho pidvodnoho aparata u doslidovomu baseini*. Zbirnyk naukovykh prats. Mykolaiv: NUK, no 2, pp. 32-39.

11. Vorobiov, Yu. L., Baskakov, S.M. (2003). Tekhnika osvoinnia kontynentalnoho shelfu. Odesa: ONMA.
12. Liskin, V.A., Zaretskiy, A.V., Rimskiy-Korsakov, N.A. (2019). Razrabotka glubokovodnykh buksiruemykh sistem dlya issledovaniya pridonnoy oblasti okeana: Nauchnoe obozrenie. Tekhnicheskie nauki, no 1, pp. 37-42. Retrieved from: <https://science-engineering.ru/ru/article/view?id=1229>.
13. Bugaenko, B.A. (2004). Dinamika sudovykh spuskopodemnykh operatsiy. Kiev: Naukova dumka.
14. Siciliano Khatib. Handbook of Robotics. Springer Verlag Berlin Heidelberg. (2008). Retrieved from: https://books.google.com.ua/books?id=Xpgi5gSuBxsC&pg=PA1005&lpg=PA1005&dq=Underwater++ROV+Monographies&source=bl&ots=IVpkX4I71O&sig=ACfU3U3DChQbaw2_BUMpJ8jUSNut_9IYPg&hl=uk&sa=X&ved=2ahUKEwj0KOD4snqAhUIx4sKHSZ4BQoQ6AEwAHoECAoQAQ#v=onepage&q=Underwater%20%20ROV%20Monographies&f=false
15. WHOI Towed Vehicle «CAMPER». Retrieved from: <http://www.whoi.edu/main/camper>

Блинцов В. С., Ключков А. П., Куценко П. С. КЛАССИФИКАЦИОННЫЕ ПРИЗНАКИ НЕОБИТАЕМЫХ ПРИВЯЗНЫХ ПОДВОДНЫХ СИСТЕМ КАК СОСТАВЛЯЮЩАЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Стадия проектирования достаточно ресурсоемкие в общем процессе создания средств морской робототехники. Поэтому актуальной является прикладная научная задача снижения ресурсных затрат таких процессов, в том числе и за счет сокращения затрат времени на выполнение проектных работ путем определения проектных характеристик уже на ранних стадиях проектирования. Предложенный подход к снижению таких расходов предусматривает структурирование классификационных признаков привязных подводных систем таким образом, чтобы максимально упростить выбор и обоснование проектных решений на стадии эскизного проектирования. Для проектировщиков подводной техники предложен перечень классификационных признаков привязных самоходных и буксируемых подводных систем, основанный на системном подходе и структурированный в соответствии с материальными, энергетическими, информационными и эксплуатационными (функциональными) критериями. Это позволяет выполнять сравнительную оценку существующих систем по ключевым показателям и формализовать процессы их синтеза на ранних стадиях проектирования. Для демонстрации возможностей системного подхода разработаны обобщенный алгоритм организации проектных работ с применением предложенной системы классификационных признаков привязных самоходных и буксируемых подводных систем на ранних стадиях их проектирования. Алгоритм предусматривает формирование и структурирование множества классификационных признаков таких систем, как первичный этап процесса принятия эффективных конструкторских решений на ранних стадиях проектирования средств подводной робототехники. Показано, что использование предложенных классификационных признаков позволяет с минимальными затратами проектных ресурсов обратиться в соответствующие базы данных и выбрать ранее созданные артефактные проекты и выбрать доступные на рынке подводной техники узлы и детали подводных систем, удовлетворяющие требованиям технического задания на создание привязных подводных систем. Это существенно снижает себестоимость проектных работ и повышает конкурентоспособность отечественных наукоемких разработок на рынках морской робототехники.

Ключевые слова: привязная подводная система, проектирование, системный подход, классификационные признаки.

Blintsov V. S., Klochkov O. P., Kucenko P. S. CLASSIFICATION CHARACTERISTICS OF UNMANNED TETHERED UNDERWATER SYSTEMS AS A COMPONENT OF IMPROVING THE EFFICIENCY OF THEIR DESIGN

The design stage is quite resource-intensive in the overall process of creating marine robotics. Therefore, the applied scientific problem of reducing the resource costs of such processes is relevant, including by reducing the time spent on design work by determining the design characteristics at an early stage of design. The proposed approach to reducing such costs involves structuring the classification features of tethered underwater systems in such a way as to simplify the selection and justification of design decisions at the stage

of sketch design. For designers of underwater equipment, a list of classification features of tethered self-propelled and towed underwater systems is proposed, which is based on a systems approach and structured according to material, energy, information and operational (functional) criteria. This makes it possible to perform a comparative assessment of existing systems on key indicators and to formalize the processes of their synthesis in the early stages of design.

To demonstrate the capabilities of the system approach, a generalized algorithm for the organization of design work using the proposed system of classification features of tethered self-propelled and towed underwater systems in the early stages of their design. The algorithm involves the formation and structuring of many classification features of such systems as the initial stage of the process of making effective design decisions in the early stages of design of underwater robotics.

It is shown that the use of the proposed classification features allows with minimal project resources to access the relevant databases and select previously created artifact projects and select available on the market of underwater equipment components and parts of underwater systems that meet the requirements of the technical task to create tethered underwater systems. . This significantly reduces the cost of design work and increases the competitiveness of domestic science-intensive developments in the markets of marine robotics.

Keywords: *tethered underwater system, design, system approach, classification features.*

© Блінцов В. С., Клочков О. П., Куценко П. С.

Статтю прийнято
до редакції 26.06.20

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОЛОЖЕННЯ ТРУБКИ В ПУЧКУ ТРУБ КОЖУХОТРУБЧАСТОГО ТЕПЛООБМІННИКА НА ПРОЦЕС ТЕПЛОВІДДАЧІ

Луняка К. В., д.т.н., професор кафедри теплотехніки Херсонської філії Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, e-mail: lunyaka213@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5208-1701;

Клюєв О. І., к.т.н., доцент кафедри транспортних технологій і технічного сервісу Херсонського національного технічного університету, e-mail: kluevoi@ukr.net, ORCID : 0000-0001-6803-0706;

Русанов С. А., к.т.н., доцент кафедри транспортних систем і технічного сервісу Херсонського національного технічного університету, e-mail: ohvrbm@i.ua, ORCID: 0000-0002-1003-4867;

Клюєва О. О., аспірантка кафедри транспортних систем і технічного сервісу Херсонського національного технічного університету, e-mail: kluevaaleksandra64@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8822-7792

Метою дослідження є встановлення причини виходу з ладу периферійних труб кожухотрубчастого теплообмінного апарата і створення умов для інтенсифікації процесу тепловіддачі в цих апаратах. Проведене визначення швидкостей руху рідини, що нагрівається в трубах апарата, температури, до якої вона нагрівається, температури стінки труби та коефіцієнтів тепловіддачі залежно від положення даної труби в пучку труб (центральне чи периферійне).

Показано, що температура стінок периферійних труб значно перевищує таку для центральних, а коефіцієнт тепловіддачі у центральних трубах у 1,5 рази більший за цю величину для периферійних труб, що є причиною перегріву та виходу з ладу периферійних труб.

Показаний шлях подолання такого недоліку кожухотрубчастого апарата, як нерівномірний розподіл рідини по окремих трубах, який полягає у створенні розподільних вставок. Дослідження різних варіантів вставок дозволили знайти оптимальну їхню форму – у вигляді диска з розрахованою площею отворів на певних ділянках.

Визначення температур рідини на виході з окремих труб, температур стінки і коефіцієнтів тепловіддачі в КТА, постачених розподільними вставками, показало, що названі показники вирівнюються для усіх труб пучка

Ключові слова: кожухотрубчастий теплообмінний апарат, нерівномірність розподілу рідини по трубах, тепловіддача, розподільні вставки.

DOI: 10.33815/2313-4763.2020.1.22.099-108

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими або практичними завданнями. Кожухотрубчасті теплообмінні апарати (КТА) широко використовуються в різних галузях господарства. До недоліків таких апаратів слід віднести нерівномірність розподілу рідини по трубах діаметрального ряду апарата, внаслідок чого швидкості руху теплоносія по периферійних трубах значно менші за такі в центральних, що є причиною перегріву та виходу з ладу периферійних труб. Тому дослідження рівномірності розподілу рідини, що нагрівається, по трубах теплообмінника і створення пристроїв для вирівнювання швидкостей руху рідини й умов тепловіддачі в різних трубах КТА є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковане розв'язання даної проблеми і виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.

Кожухотрубчасті теплообмінні апарати забезпечують надійний теплообмін між теплоносіями завдяки значній поверхні теплообміну, яка утворюється великою кількістю труб. Порівнюючи ефективність роботи теплообмінників різного типу, дослідники [1–3] дійшли висновку про перевагу даного типу теплообмінників перед іншими. У зв'язку з цим не припиняються роботи по вдосконаленню конструкцій, поліпшенню обслуговування, підвищенню ефективності роботи цих апаратів [4–6].

Будь-які методи інтенсифікації теплообміну спираються на керування гідродинамікою процесів. Тому значна частина робіт присвячена саме вивченню впливу характеру руху теплоносія на інтенсивність теплообміну. Численні роботи [7–11] підтверджують значний вплив на теплові процеси гідродинаміки руху потоків. З метою інтенсифікації роботи теплообмінників використовують або методи збільшення поверхні теплообміну, або сприяють створенню турбулентних потоків теплоносіїв в апараті (оребріння, вставка турбулізаторів). Ці заходи суттєво впливають на ефективність роботи теплообмінників, підвищуючи коефіцієнт тепловіддачі у декілька разів.

Недоліком названих методів є складність у виготовленні турбулізаторів, збільшення гідравлічного опору, а також створення зон, які піддаються забрудненню, що, передусім сприяє зниженню ефективності роботи теплообмінників, оскільки спричиняє більш часті проведення профілактичних і ремонтних заходів.

Але усі названі заходи малоефективні у разі, якщо теплоносієм практично не надходить у трубу внаслідок нерівномірності розподілу швидкостей потоків по трубах. Останнє підтверджується тим, що на практиці дуже часто відбувається вихід з ладу саме певної частини труб, що спричиняє необхідність більш частого ремонту апаратів. Але робіт, присвячених вивченню рівномірності розподілу швидкості рідини в трубах теплообмінника, вкрай мало. До них можна віднести винахід [12], де інтенсифікація тепломасообміну досягається шляхом підвищення рівномірності розподілу рідини по трубах тепломасообмінних апаратів плівкового типу. А втім, саме рівномірний розподіл швидкості теплоносія по трубах насамперед сприяє підвищенню ефективності роботи теплообмінника, оскільки, як було вже сказано, надто повільний рух рідини у частині труб знижує ефективність роботи апарата.

В роботах [13–15] показано, що розподіл рідини по трубах апарата досить нерівномірний – у центральних і периферійних трубах значно відрізняються тиски рідини і швидкості її руху, і запропоновано вирівнювати швидкості руху рідини в трубах шляхом встановлення в колекторній камері апарата розподільник вставок.

У зв'язку зі сказаним, потрібно провести аналіз тепловіддачі в трубах теплообмінного апарата залежно від їхнього положення в трубній решітці й оцінити вплив розподільних вставок на умови тепловіддачі.

Формулювання мети статті, постановка задачі. Метою дослідження є оцінка тепловіддачі в різних трубах кожухотрубчастого теплообмінного апарата і створення умов для рівномірного прогрівання усіх труб. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- дослідити зміни температур окремих труб кожухотрубчастого теплообмінного апарата залежно від їхнього положення у трубній решітці;
- розрахувати коефіцієнти тепловіддачі від труб до рідини, що нагрівається, залежно від положення труб;
- розробити пристрої для вирівнювання швидкостей рідини, її температури та коефіцієнтів тепловіддачі в різних трубах незалежно від їхнього положення у трубній решітці.

Об'єктом дослідження є кожухотрубчастий теплообмінний апарат. **Предметом дослідження** є рівномірність розподілу рідини, що нагрівається, по окремих трубах апарата і створення умов для рівномірної тепловіддачі від труб.

Виклад матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. При виконанні роботи застосовувався експериментально-теоретичний метод дослідження. Експериментальна розрахункова частина полягала в отриманні та обробці даних щодо визначення швидкостей руху рідини, що нагрівається, по трубах теплообмінного апарата, температур рідини та стінок апарата, розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі від стінок труб до рідини залежно від положення труб та температури нагрівальної рідини (теплоносія).

Дослідження розподілу швидкості рідини по трубах діаметрального ряду кожухотрубчастого теплообмінника проводилися на спеціально створеній експериментальній установці, яка являла собою фрагмент реального теплообмінника з діаметром кожуха 150 мм, 37 трубами діаметром 14×1,5 мм, розташованими по колу (рис. 1). Для зручності дослідження була відрізана верхня частина апарата з кришкою, у верхні частини труб були вварені штуцери для приєднання дифманометрів, у труби одного діаметрального ряду були також вварені термопари.

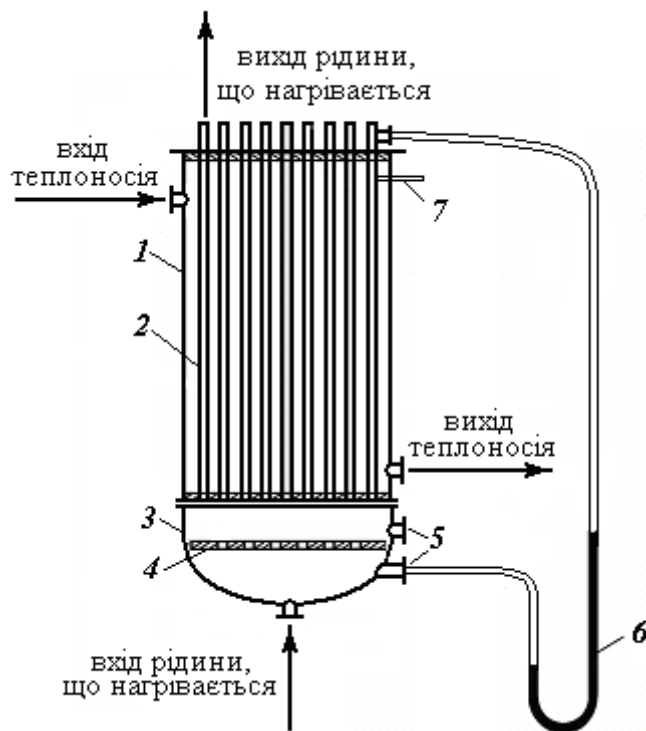


Рисунок 1 – Схема експериментальної установки:

1 – корпус; 2 – труби; 3 – колекторна камера; 4 – розподільна вставка; 5 – штуцери для дифманометра; 6 – дифманометр; 7 – термопара

У трубний простір через штуцер у нижній кришці, розташований по осі апарата, подавали воду (вода, що нагрівається) з температурою 20 °С, яка підтримувалася за допомогою термостата; температура води на виході з трубки вимірювалася термопарою.

У міжтрубному просторі циркулювала вода (назвемо її теплоносієм) з температурою 60, 80 або 95 °С, яка підтримувалася шляхом її прокачування через термостат.

Виміри здійснювалися для половини труб діаметрального ряду, оскільки за такої умови спостерігається симетричний розподіл швидкості за загальних параметрів, указаних у табл. 1.

Таблиця 1 – Параметри, загальні для досліджень

№ трубки	$t_n, ^\circ\text{C}$	$\omega, \text{ м/с}$	$G, \text{ кг/с}$	$Q, \text{ Вт}$	Re
1	20	0,20	0,030	1003	3029
2	20	0,72	0,110	1839	10470
3	20	1,44	0,221	1847	20510
4	20	1,55	0,238	1989	22098

Позначення до табл. 1 і далі:

ω – швидкість руху рідини, що нагрівається, в трубах КТА, м/с;

t_n , – початкова температура рідини, що нагрівається, °С;

t_k , – кінцева температура рідини, що нагрівається, °С;

$t_{сер}$, – середня температура рідини, що нагрівається, °С;

$t_{ст}$, – температура стінки труби, °С;

G – масова витрата рідини, що нагрівається, кг/с;

Q – теплота, що передається від стінки труби до рідини, що нагрівається, Вт;

Re – критерій Рейнольда;

α – коефіцієнт тепловіддачі від стінки труби до рідини, що нагрівається, Вт/(м²·К).

Основними показниками, що характеризують роботу теплообмінника, ми вважали різницю температур рідини на вході в апарат і на виході з нього, температуру стінки труби і коефіцієнт тепловіддачі.

Результати експериментів і розрахунків наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Залежність температур води, що нагрівається, і коефіцієнтів тепловіддачі від температури теплоносія і положення трубки

$t_{\text{теплоносія}},$ °C	№ трубки	$t_{\text{к}},$ °C	$t_{\text{н}}-t_{\text{к}}$	$t_{\text{сеп}},$ °C	$t_{\text{см}},$ °C	$\alpha, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$
60	1	25	5	22,5	43	1232
	2	22	2	21,5	39	3343
	3	21,5	1,5	20,8	37	5821
	4	21,5	1,5	20,8	35	6174
80	1	28	8	24	56	1215
	2	24	4	22	48	3397
	3	22	2	21	45	5818
	4	22	2	21	44	6176
95	1	30	10	25	64	1243
	2	27	7	23,5	57	3386
	3	24	4	22	54	5828
	4	23	3	21,5	52	6185

На рис. 2 представлені дані щодо впливу температури теплоносія на температуру води, що нагрівається, у трубках апарата залежно від положення трубки (на периферії або ближче до центра).

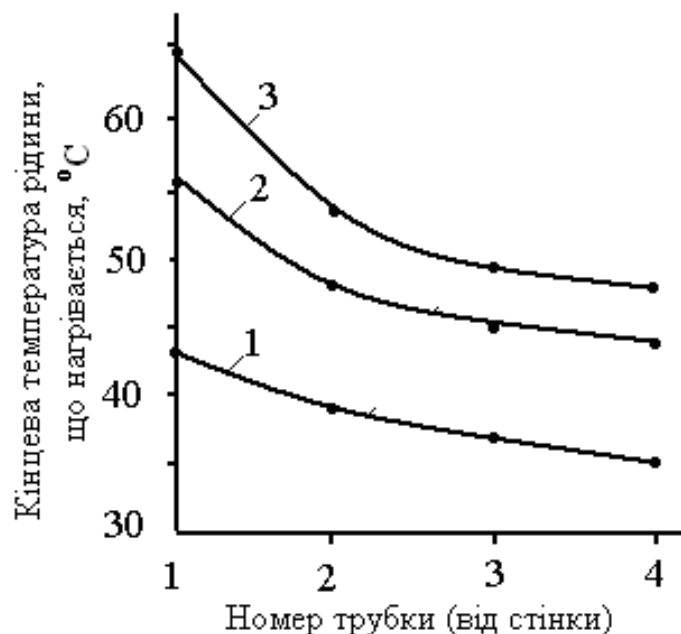


Рисунок 2 – Вплив положення трубки на кінцеву температуру рідини, що нагрівається, за різних температур теплоносія: 1 – 60 °C; 2 – 80 °C; 3 – 95 °C

На рис. 3 наведені залежності різниць температур між температурою теплоносія і температурою периферійної трубки (верхня лінія) і між периферійною та центральною трубками. Як бачимо, внаслідок низької швидкості води, що нагрівається, у периферійній трубці відведення теплоти від неї ускладнене, тому спостерігається помітний перегрів

стілки цієї трубки – різниця температур між стінкою труби і теплоносієм зростає. З підвищенням температури теплоносія ця різниця збільшується, і при температурі 95 °С вона складає 30 °. Зважаючи на те, що часто як теплоносієм використовується водяна пара з температурами 130–150 °С, при лінійній залежності між $\Delta t_{\text{теплоносія}}$ і $t_{\text{ст.}}$ можна очікувати перегрів периферійних труб на 40–50 °С, що й спричиняє вихід їх з ладу. Що стосується різниці температур між периферійною та центральною трубками, то з підвищенням температури теплоносія вона також зростає.

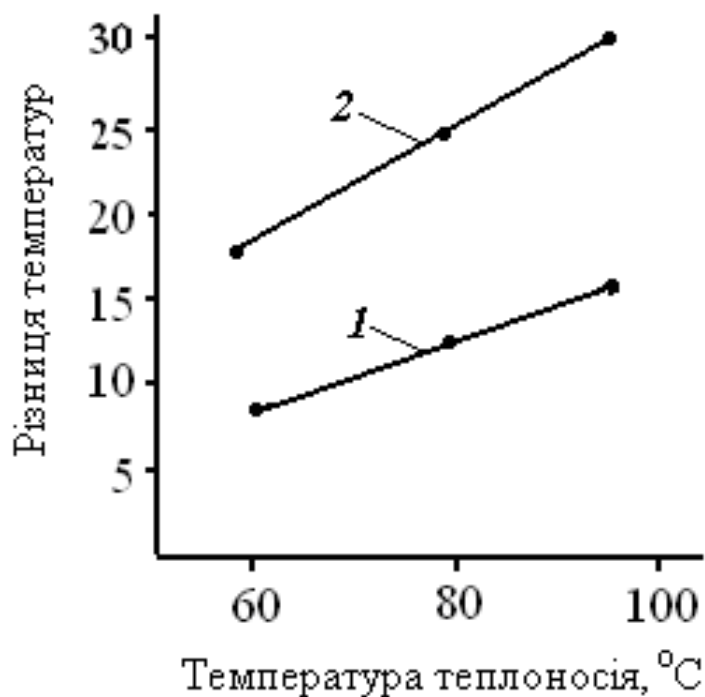


Рисунок 3 – Залежність різниці температур між периферійною та центральною трубками (лінія 1) і між теплоносієм і периферійною трубкою (лінія 2)

На рис. 4 представлений вплив положення трубки на величину коефіцієнта тепловіддачі від стінки трубки до води, що нагрівається. Ми бачимо, що ця величина у центральній трубці у п'ять разів перевищує ту, що у периферійній, що також свідчить про низьку ефективність тепловіддачі у частині труб КТА.



Рисунок 4 – Вплив положення трубки на величину коефіцієнта тепловіддачі

Отже, отримані результати свідчать про те, що нерівномірний розподіл швидкості руху теплоносія (у центральній трубці швидкість руху рідини складала 1,55 м/с, а у периферійній – 0,2 м/с) спричиняє значні відхилення таких показників, як температура рідини на виході з апарата, температура стінки труби і коефіцієнти тепловіддачі від труби до рідини, що нагрівається.

З метою створення сприятливих умов теплообміну було запропоновано [14] використовувати розподільні вставки з розрахованим опором (кількістю отворів) за фрагментами (периферійний, проміжний і центральний). Розглянемо, як у цьому випадку розподіляються температури стінки труби та коефіцієнти тепловіддачі залежно від розташування труби.

Для цього в експериментальному теплообміннику використовувалася розподільна вставка (рис. 1, поз. 4). Досліди проводилися аналогічно описаному раніше.

При використанні розподільної вставки відбувалося вирівнювання швидкостей руху рідини в трубах. Так, швидкість складала: для 1 трубки – 0,87 м/с, 2 – 0,89 м/с, 3 – 0,90 м/с, 4 – 0,92 м/с. Це призвело до вирівнювання інших показників – температури води на виході, температури стінки труби і коефіцієнтів тепловіддачі. Про це свідчать експериментальні дані для температури теплоносія 60 °С, наведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Залежність температур води, що нагрівається, і коефіцієнтів тепловіддачі від температури теплоносія і положення трубки при використанні розподільної вставки

$t_{\text{теплоносія}},$ °С	№ трубки	$t_k, °С$	$t_n - t_k$	$t_{\text{сер}}, °С$	$t_{\text{ст}}, °С$	$\alpha, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$
60	1	21,5	1,5	20,8	38	3908
	2	21,6	1,6	20,8	37	3959
	3	21,7	1,7	20,8	37	3996
	4	21,6	1,6	20,8	37	4067
	середні	21,6	1,6	20,8	37	3982

Представлені результати показали, що при використанні розподільної вставки, яка являє собою диск з оптимальним розташуванням отворів, спостерігається вирівнювання швидкостей руху рідини по трубах діаметрального ряду. На відміну від експериментів, при яких розподільна вставка не використовувалася, при використанні запропонованої розподільної вставки різниця у швидкостях у центральній і боковій трубах не перевищує 5 %, тобто потік рідини розподіляється по трубах рівномірно. Це призводить до рівномірного нагрівання як центральних, так і бокових труб, що запобігає перегріву периферійних труб.

Отже, створення рівномірного поля швидкостей теплоносія по трубах кожухотрубного теплообмінника сприяє рівномірному нагріванню як центральних, так і периферійних труб, і підвищенню коефіцієнта тепловіддачі у бокових трубах. На практиці це призводить до збільшення терміну роботи теплообмінника між ремонтами і підвищення ефективності роботи апарата.

Висновки і перспектива подальшої роботи в даному напрямі. Отримані результати свідчать про те, що причиною виходу з ладу або низької ефективності тепловіддачі в периферійних трубах кожухотрубчастого теплообмінного апарата є нерівномірність розподілу швидкостей руху рідини в різних трубах і внаслідок цього низьких коефіцієнтів тепловіддачі в тих трубах, де ця швидкість мала. Використання розподільних вставок надає можливість без великих матеріальних витрат підвищити ефективність роботи теплообмінників і збільшити термін їхньої роботи між ремонтами або профілактичними заходами. (конкретизувати).

Як перспективу подальшої роботи у даному напрямі ми вважаємо проведення паспортизації працюючих на різних виробництвах кожухотрубчастих теплообмінників з

метою пропозиції організації майстерні або ділянки майстерні з виготовлення розподільних пристроїв і встановлення їх на працюючих апаратах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Incropera F. P., Dew. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Sth ed. Wiley, New York, 2001. 584 p.
2. Валуева Е. П., Доморацкая Т. А. Оценка теплогидравлической эффективности рекуперативных теплообменных аппаратов. *Теплоэнергетика*. Московский энергетический институт, 2000. № 3. С. 43–48.
3. Сергеев С. М. Экспериментальное исследование и разработка методов повышения тепловой эффективности пучков гладких труб при установке внешних турбулизаторов : автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. Москва : Моск. гос. откр. ун-т, 2000. 22 с.
4. Матушкін М. П. Методи інтенсифікації конвективного теплообміну в теплообмінних апаратах. *Хімічна промисловість України*. 1998. С. 29–34.
5. Luo Xiaoping, Deng Xianhe, Deng Songjiu. Сравнение характеристики теплоотдачи труб с интенсифицированной теплоотдачей в кольцевых каналах. *Huanan ligong daxue xuebao. Ziran kexue ban = J.S. China Univ. Tehnol. Natur. Sci.* 1997. № 5. С. 26–30.
6. Shah R.K., Kraus A.D., Metzger D. Compact Heat Exchangers. Hemisphere Publishing Corporation, New York. 1990. 736 p.
7. Хохендорф У., Юрманов Б. Н., Новгородский Е. Е. Интенсификация теплообмена в трубном пучке. *Проблемы энергообеспечения и экологии : сборник научных трудов*. Брянск : Изд-во Брянск. гос. техн. ун-та. 2001. С. 10–19.
8. Kays W.M., London A.L. Compact Heat Exchangers, Krieger Publishing Company, Malabar, FL, 1998. 398 p.
9. Enhancement of heat transfer by a combination of three – stats spirally corrugated tubes with a twisted tape. Zimparov Ventsislav (Gabrovo Technical University, 4 Hadji Dimitar Street, BG – 5300 Gabrovo, Bulgaria E-mail address: vdzim tugab.bg.(V. Zimparov)). *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 2001. 44, № 3, P. 551–574.
10. Dutta S., Dutta P., Jones. R. E., Khan J. A. Heat transfer coefficient enhancement with perforated baffles. *Trans. ASME. J.Heat Transfer*. 1998. 120, № 3. P. 795–797.
11. Kakas S., Liu H. Heat Exchan: Selection, Ration and Thermal Design. CRC Press, Boca Ration, FL, 2002. 472 p.
12. Zpusob odstranovani nanosu a usarenin Fiala Milos, Novorka Gustav A. с. 226239, ЧССР. Заявл. 16.12.81, №PV 9354-81, опубл. 01.02.86. МКИ В 08 В3/08.
13. Луняка К. В., Ключев О. І., Русанов С. А., Луняка Л. А. Оцінка ефективності роботи кожухотрубчастого теплообмінного апарату. *Тези Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : матеріали ІХ Міжнародної науково-технічної конференції*. Миколаїв, 2018. С. 261–264.
14. Луняка К. В., Ключев О. І., Русанов С. А. Створення рівномірного розподілу руху теплоносія в трубах кожухотрубчастого теплообмінника за допомогою розподільних вставок. *Транспорт: Механічна інженерія. Експлуатація. Матеріалознавство : матеріали Міжнародної науково-технічної конференції*. Херсон, 2017. С. 35–36.
15. Ключев О. І., Луняка К. В., Русанов С. А. Дослідження рівномірності розподілу рідини по трубах кожухотрубчастого теплообмінного апарату при різних способах введення рідини в апарат і створення нових конструкцій розподільних пристроїв. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2019. Вип. 38. С. 53–57.

REFERENCES

1. Incropera F.P., Dew. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Sth ed. Wiley, New York. 2001. 584 p.
2. Valueva E.P., Domorackaja T.A. [Assessment of the thermohydraulic efficiency of recuperative heat exchangers], *Moskovskij jenergeticheskij institut [Moscow Power Engineering Institute]*, *Teplojenergetika [Heat power engineering]*. 2000. №3. P.43-48. [in Russian].
3. Sergeev S.M. [Experimental research and development of methods to increase the thermal efficiency of smooth tube bundles when installing external turbulators], Extended abstract of candidate's thesis, Moskow, *Moskovskij gosudarstvennyj otkrytyj universitet [Moscow State Open University]*. 2000. 22p. [in Russian].
4. Matushkin M.P. [Methods of intensification of convective heat transfer in heat exchangers], Zhytomyr, *Khimichna promyslovist Ukrainy [Chemical industry of Ukraine]*.1998. P.29-34. [in Ukrainian].
5. Luo Xiaoping, Deng Xianhe, Deng Songjiu [Comparison of heat transfer characteristics of pipes with intensified heat transfer in annular channels], *Journal of South China University of Technology*.1997. №5. P.26-30. [in Russian].
6. Shah R.K., Kraus A.D., Metzger D. Compact Heat Exchangers. Hemisphere Publishing Corporation, New York. 1990. 736 p.
7. Hohendorf U., Jurmanov B.N., Novgorodskij E.E [Intensification of heat transfer in a tube bundle. Problems of energy supply and ecology], *Sbornik nauchnyh trudov [Collection of scientific papers]*, Bryansk, *Brjanskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet [Bryansk State Technical University]*. 2001. P. 10-19.
8. Kays W.M., London A.L. Compact Heat Exchangers, Krieger Publishing Company, Malabar, FL. 1998. 398 p.
9. Enhancement of heat transfer by a combination of three – stats spirally corrugated tubes with a twisted tape. Zimparov Ventsislav (Gabrovo Technical University, 4 Hadji Dimitar Street, BG – 5300 Gabrovo, Bulgaria E-mail address: vdzim tugab.bg.(V. Zimparov)).*Int. J. Heat and Mass Transfer*. 2001. 44. №3. P.551-574.
10. Dutta S., Dutta P., Jones. R.E., Khan J.A. Heat transfer coefficient enhancement with perforated baffles, *trans. ASME. J.Heat Transfer*. 1998. 120. №3. P. 795-797.
11. Kakas S., Liu H. Heat Exchan: Selection, Ration and Thermal Design. CRC Press, Boca Ration, FL. 2002.472 p.
12. Fiala Milos, Hovorka Gustav A. «Zpusob odstranovani nanosu a usarenin» с. 226239, СССР. Заявл. 16.12.81, №PV 9354-81, опубл. 01.02.86. МКИ В 08 В3/08. [in Russian].
13. Lunyaka K.V., Kliuiev O.I., Rusanov S.A., Lunyaka L.A. Otsinka efektyvnosti roboty kozhukhotrubchastoho teploobminnoho aparatu [Evaluation of the efficiency of the shell-and-tube heat exchanger], *Tezy Innovatsii v sudnobuduvanni ta okeanotekhnitsi, Materialy IKh Mizhnarodnoi naukovo-tekhničnoi konferentsii [Abstracts of Innovations in Shipbuilding and Ocean Engineering, Proceedings of the IX International Scientific and Technical Conference]*, Mykolaiv. 2018. P.261-264. [in Ukrainian].
14. Luneaka K.V., Kliuiev O.I., Rusanov S.A., Lunyaka L.A. Stvorennia rivnomirnoho rozpodilu rukhu teplonosiiia v trubakh kozhukhotrubchastoho teploobminnyka za dopomohoiu rozpodilnykh vstavok [Creating a uniform distribution of the movement of the coolant in the pipes of the shell-and-tube heat exchanger by means of distribution inserts], *Materialy Mizhnarodnoi naukovo-tekhničnoi konferentsii «Transport: Mekhanichna inzheneriia. Ekspluatatsiia. Materialoznavstvo [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference «Transport: Mechanical Engineering. Operation. Materials Science]*, Kherson. 2017. P.35-36. [in Ukrainian].

15. Kliuiev O.I., Lunyaka K.V., Rusanov S.A. [Investigation of the uniformity of fluid distribution through the pipes of the shell-and-tube heat exchanger with different methods of introducing fluid into the apparatus and creating new designs of switchgear], Visnyk Pryazovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu [Bulletin of Priazovsky State Technical University], Series: Technical Sciences. Vip. 38.2019. P.53-57.[in Ukrainian].

Луняка К. В., Ключев О. И., Русанов С. А., Ключева А. О. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ТРУБКИ В ПУЧКЕ ТРУБ КОЖУХОТРУБНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА НА ПРОЦЕСС ТЕПЛООТДАЧИ

Целью исследования является установление причины выхода из строя периферийных труб кожухотрубного теплообменного аппарата и создания условий для интенсификации процесса теплоотдачи в этих аппаратах.

Проведено определение скоростей движения жидкости, нагреваемой в трубах аппарата, температуры, до которой она нагревается, температуры стенки трубы и коэффициентов теплоотдачи в зависимости от положения данной трубы в пучке труб (центральная или периферийная).

Расчет коэффициентов теплоотдачи проводился на основании скорости движения нагреваемой жидкости в отдельных трубах, определяемой по расходу жидкости и площади сечения трубки; ее температурах на входе в трубку (поскольку холодная жидкость поступала из термостата, её температура была известна) и выходе из нее (измерялась с помощью термометра); температуры стенок трубы, измеряемых термомпарами; количества теплоты, передаваемой от стенок трубы к нагреваемой жидкости, рассчитанного из уравнения теплоотдачи.

Показано, что температура стенок периферийных труб значительно превышает таковую для центральных, а коэффициент теплоотдачи в центральных трубах вкратце больше этой величины для периферийных труб, что является причиной перегрева и выхода из строя периферийных труб.

Показан путь преодоления такого недостатка кожухотрубного аппарата, как неравномерное распределение жидкости по отдельным трубам, который состоит в создании распределительных вставок. Исследования разных вариантов вставок позволили найти оптимальную их форму – в виде диска с рассчитанной площадью отверстий на определенных участках.

Определения температур жидкости на выходе из отдельных труб, температур стенки и коэффициентов теплоотдачи в КТА, снабженных распределительными вставками, показало, что названные показатели выравниваются для всех труб пучка.

Ключевые слова: кожухотрубный теплообменный аппарат, неравномерность распределения жидкости по трубам, теплоотдача, распределительные вставки.

Lunyaka K. V., Kliuiev O. I., Rusanov S. A., Kliuieva O. O. RESEARCH OF INFLUENCING OF POSITION OF TUBE IN THE BUNCH OF PIPES OF KOZHUKHOTRUBNOGO TEPLOOBMENNYKA ON THE PROCESS OF HEAT EMISSION

The article is devoted to the problem of fluid distribution in the pipes of the diametrical bank of shell and tube heat exchanger. The experimental-theoretical method of research was used. Data on the determination of the velocities of the heated liquid through the pipes of the heat exchanger were obtained and processed. The research was carried out on the created experimental plant.

Water with a temperature of 20 °C was supplied to the pipes, which was maintained by a thermostat. The temperature at the outlet of the tube was measured with a thermocouple. Water (heat conductor) with a temperature of 60, 80 or 95 °C was circulating in the intertube space, which was maintained by pumping it through a thermostat.

The velocities of the heated liquid in the pipes of diametric bank were determined, which differed significantly depending on the position of the pipe and this led to significant deviations of such parameters as the liquid temperature at the outlet of the apparatus, pipe wall temperature and heat transfer coefficients from pipe to heated liquid.

The distribution insert was used, in order to align the above-mentioned indicators. The distribution insert is a disk with the optimized holes. The alignment of the velocities of the fluid through the pipes of the diametric bank was observed. This leads to uniform heating of both the central and side pipes. It prevents overheating of the peripheral pipes was found.

Thus, the creation of a uniform field of velocities of the coolant through the pipes of the shell and tube heat exchanger contributes to the uniform heating of both central and peripheral pipes, and increase the heat transfer coefficient in the side pipes.

It was concluded that the reason for failure or low efficiency of heat transfer in the peripheral pipes of the shell an -tube heat exchanger is the uneven distribution of fluid velocities in different pipes and consequently low heat transfer coefficients in those pipes where this speed is low. It may be started that using of distribution inserts opens the possibility without high material costs to increase the efficiency of heat exchangers and increase their service life between repairs or planned maintenance.

Keywords: *shell and tube heat exchanger, non-uniform distribution of liquid in pipes heat transfer, distribution inserts.*

© Луняка К. В., Ключев О. І., Русанов С. А., Ключева О. О.

Статтю прийнято
до редакції 25.05.20

АНАЛІЗ ПРИЧИН ВИНИКНЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВІДМОВ ЕЛЕМЕНТІВ ПРИВОДУ ПАЛИВНОГО НАСОСА ВИСОКОГО ТИСКУ СУДНОВОГО ДИЗЕЛЯ MaK M43

Проценко В. О., д.т.н., професор Херсонської державної морської академії, e-mail: 1904pvo@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3468-4952;

Бабій М. В., к.т.н., доцент Херсонської державної морської академії, e-mail: M_Babiy@ukr.net, ORCID: 0000-0002-0560-2081;

Настасенко В. О., д.т.н., професор Херсонської державної морської академії, e-mail: Nastasenko2004@ukr.net, ORCID: 0000-0002-0330-1138;

Маринченко Д. О., курсант Херсонської державної морської академії, ORCID: 0000-0002-1870-2532;

Мартишевський Д. О., курсант Херсонської державної морської академії

Метою дослідження є встановлення можливостей зниження чутливості приводу паливного насоса високого тиску (ПНВТ) суднового дизеля до похибок виготовлення та монтажу деталей за рахунок ліквідації надлишкових зв'язків у його механізмі.

Проаналізовано структуру механізму приводу ПНВТ дизеля MaK M43, за рахунок чого встановлено, що внаслідок недосконалої конструкції приводу, а саме наявності в його механізмі надлишкових зв'язків, за присутності перекосу осей ролика та паливного кулака виникає концентрація навантаження біля краю підшипникової втулки ролика, що стає причиною її руйнування. Надлишкові зв'язки унеможливають самоустановку ролика по кулачку, а відтак рівномірний розподіл навантаження по довжині підшипникової втулки. В результаті структурного аналізу механізму приводу ПНВТ показано, що він містить два надлишкових зв'язки, які обидва розташовані в контурі, що обмежений важелем, роликом та паливним кулаком і являють собою обмеження поворотів навколо осей X та Y. Виключення надлишкових зв'язків забезпечується додаванням двох рухомостей у зазначений контур, чого можна досягти наданням поверхні катання ролика бочкоподібної форми (варіант I), або сполученням важеля з блоком дизеля за рахунок сферичної опори (варіант II). Показано, що раціональним вибором співвідношення радіусів ролика та його бочкоподібної поверхні катання можна досягти допустимих значень контактних напружень в парі «паливний кулак-ролик», що ілюструє резерви застосування варіанту I для застосування на двигунах, що знаходяться в експлуатації. Варіант II має резерв для використання при створенні нових конструкцій дизелів, оскільки потребує значної зміни конструкції важеля та його опори. Запропоновано напрямки подальших досліджень.

***Ключові слова:** судновий дизель; паливний насос високого тиску; паливний кулак; надлишкові зв'язки; контактні напруження.*

DOI: 10.33815/2313-4763.2019.1.22.109-120

Вступ. В теперішній час дизель є найголовнішим, найнапруженішим елементом енергетичних установок транспортних суден і слід очікувати збереження цієї тенденції на протязі найближчих років до більш широкого впровадження електроенергетичних установок. З огляду на це, аналіз відмов елементів судових дизелів та зниження рівня мінімально неминучих незворотних втрат енергії [1] в їх механізмах з метою підвищення енерго- та ресурсоощадності судових комплексів є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останніми дослідженнями [1] доведено, що знос деталей елементів паливних систем високого тиску судових дизелів (плунжерів ПНВТ) можна знизити нанесенням регулярного мікрорельєфу в 2,1–2,6 разів, а нанесення органічних покриттів сприяє підвищенню енергетичної ефективності та досягненні 24,0...44,6%-го зниження зносу плунжерів. Показано також, що керування пружно-демпфуючими властивостями граничних шарів палива може бути використане для уникнення безпосередніх контактів поверхонь тертя, що сприяє забезпеченню рівня мінімально неминучих незворотних втрат енергії в ПНВТ та зменшення інтенсивності зношування їх деталей. Такі вагомі результати досягнуто поза урахуванням вад структури експлуатованих пристроїв, які закладені ще на етапі їх проектування, зокрема таких, що обумовлюють нерівномірний розподіл навантажень між їх деталями. Інші виконані роботи

[2, 3], що стосуються приводу ПНВТ містять в основному дослідження впливу їх параметрів на процес паливоподачі, зокрема в нетипових умовах і також не зачіпають питання впливу структури на процес передачі навантаження та знос деталей. Моделі [4] обрахунку втрат на тертя у сполученні «вал-підшипник» при різних законах розподілу питомих тисків по колу та довжині контакту мають резерв удосконалення в урахуванні кутових перекосів та деформацій сполучених деталей. Оскільки значна частина відмов деталей машин усіх класів пов'язана з нерівномірністю розподілу навантаження між ними, що часто має своєю причиною наявність у їх механізмах надлишкових зв'язків [5–11]. Їх вплив іноді компенсується завищеною точністю виготовлення деталей, що призводить до підвищення вартості, а відтак збільшення експлуатаційних витрат. Іноді вплив надлишкових зв'язків може проявлятися після виконання ремонтів, оскільки останні часто супроводжуються виникненням похибок форми та розташування поверхонь внаслідок низької точності оброблення та складання під час рекондиції. Особливої гостроти набуває усунення надлишкових зв'язків у механізмах дизелів, оскільки вони містять багатоопорні вали, ланки що входять одразу в декілька кінематичних пар, що є джерелом статичної невизначеності і виникнення описаних вище явищ. Крім цього, викликана наявністю надлишкових зв'язків нерівномірність розподілу навантаження у трибосполученнях є причиною підвищення сил тертя, а відтак і мінімально неминучих незворотних втрат.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Прикладом впливу надлишкових зв'язків на процес експлуатації можуть служити руйнування підшипникових втулок роликів, що встановлені в приводі паливних насосів високого тиску (ПНВТ) суднових дизелів МаК М43, що мали місце на практиці. На одному з суден з таким головним двигуном ролики приводу ПНВТ зазнали відмов в результаті руйнування їх підшипникових втулок (рис. 1). Руйнування мало локальний характер, його зона була нерівномірно розподілена за довжиною втулки, зона найбільших руйнувань знаходилась біля одного з торців втулки, а її кутова протяжність сягала $170\text{--}180^\circ$, на другий торець ця зона не виходила. Це свідчить про наявність концентрації навантаження внаслідок кутового зміщення осей ролика та кулачка розподільчого валу. Однозначно розділити джерело таких руйнувань на ті, що мають своєю причиною похибки виготовлення і похибки монтажу навряд чи можливо, але у випадку рівномірного розподілу навантаження по довжині підшипникової втулки її знос і характер руйнування мали-б дещо інший вигляд, а її ресурс був би тривалішим.



Рисунок 1 – Фотографії роликів приводу ПНВТ зі зруйнованими підшипниковими втулками

Формулювання мети статті, постановка завдань. Метою статті є встановлення можливостей зниження чутливості приводу ПНВТ до похибок виготовлення та монтажу деталей за рахунок ліквідації надлишкових зв'язків у його механізмі.

Для досягнення поставленої мети в дослідженні необхідно вирішити такі завдання:

- виконати структурний аналіз механізму приводу ПНВТ, встановити кількість та місце розташування надлишкових зв'язків;
- намітити напрямки ліквідації надлишкових зв'язків;
- запропонувати структурні схеми механізму приводу ПНВТ без надлишкових зв'язків та намітити напрямки їх застосування.

Об'єктом дослідження є процес передавання навантаження приводом ПНВТ суднового дизеля МаК М43 від розподільчого валу до плунжера ПНВТ.

Предметом дослідження є вплив структури механізму приводу ПНВТ на процес передавання ним навантаження та пошук напрямків підвищення безвідмовності його елементів (на прикладі суднового дизеля МаК М43).

Виклад основного матеріалу дослідження. Виконання першого з поставлених завдань починаємо зі складання структурної схеми механізму приводу паливного насоса високого тиску (рис. 2). Механізм приводу являє собою складний відкритий кінематичний ланцюг, що в базовому варіанті містить п'ять рухомих ланок ($n = 5$). При подальших викладках вважаємо, що плунжер ПНВТ і плунжерна втулка утворюють пару п'ятого класу, оскільки від самовільного повороту навколо власної осі він убезпечений входженням в поступальну пару з рейковою шестернею регулювання подачі. В такому випадку кількість кінематичних пар п'ятого класу становить $P_5 = 4$ (O_5, B_5, C_5, F_5), кількість кінематичних пар четвертого, другого та першого класів $P_4 = P_2 = P_1 = 0$, кількість кінематичних пар третього класу $P_3 = 3$ (A_3, D_3, E_3).

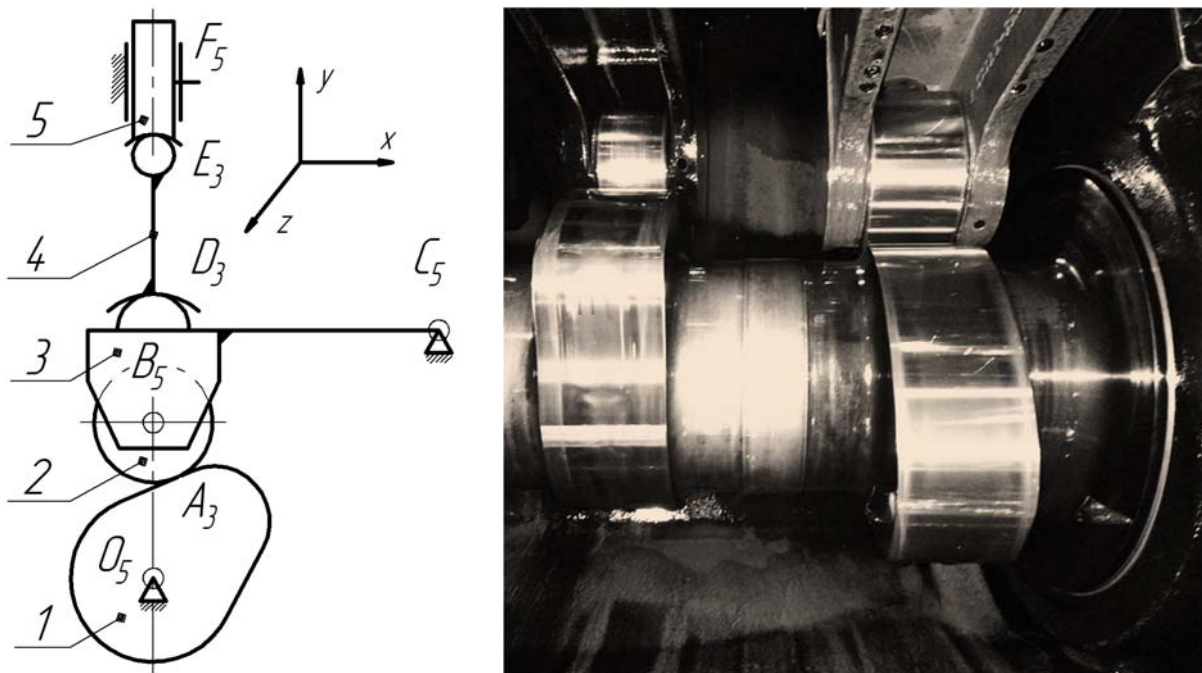


Рисунок 2 – Структурна схема механізму приводу ПНВТ в базовому варіанті та фотографія його основних елементів:

1 – паливний кулак; 2 – ролик; 3 – важіль; 4 – штовхач; 5 - плунжер ПНВТ

Тоді загальна кількість кінематичних пар:

$$P = P_5 + P_4 + P_3 + P_2 + P_1 = 4 + 0 + 3 + 0 + 0 = 7.$$

Сума рухомостей кінематичних пар:

$$f = 1P_5 + 2P_4 + 3P_3 + 4P_2 + 5P_1 = 1 \times 4 + 2 \times 0 + 3 \times 3 + 4 \times 0 + 5 \times 0 = 13.$$

Кількість незалежних замкнених контурів механізму за формулою Гохмана [12]:

$$k = P - n = 7 - 5 = 2.$$

Перший незалежний контур механізму - $C_5B_5B_5A_3O_5C_5$, другий контур - $C_5D_3E_3F_5C_5$.
Ступінь рухомості механізму за формулою Войня і Атанасіу [13]:

$$W = N - \sum r_i = 13 - (4 + 6) = 3,$$

де $N = 13$ – кількість однорухомих кінематичних пар (дорівнює сумі рухомостей, оскільки кожна сферичну трирухому пару можна замінити на три однорухомі обертові пари); $r_1 = 4$ – ранг осей незалежного контура $C_5B_5A_3O_5C_5$ (осі його кінематичних пар паралельні між собою в просторі); $r_2 = 6$ – ранг осей незалежного контура $C_5D_3E_3F_5C_5$ (осі його кінематичних пар довільно розташовані в просторі).

З них основна рухомість механізму $W_o = 1$, місцеві рухомості ланок 2 та 4 (обертання кожної навколо власної осі) $W_m = 2$.

$$W = W_o + W_m = 1 + 2 = 3.$$

Кількість надлишкових зв'язків механізму приводу за формулою Сомова-Малишева [5]:

$$q_{CM} = W + 5P_5 + 4P_4 + 3P_3 + 2P_2 + P_1 - 6n = 3 + 5 \times 4 + 4 \times 0 + 3 \times 3 + 2 \times 0 + 0 - 6 \times 5 = 2.$$

Кількість надлишкових зв'язків механізму за формулою Озола:

$$q_{Oz} = W + 6k - f = 3 + 6 \times 2 - 13 = 2.$$

Таким чином кількість надлишкових зв'язків у механізмі:

$$q = q_{CM} = q_{Oz} = 2.$$

Для виявлення місця розташування надлишкових зв'язків проаналізуємо обидва незалежних контури механізму (табл. 1).

Підтверджує наведені викладки і застосування по контурного методу (табл. 2), який дозволяє вказати і місце виникнення надлишкових зв'язків.

Таблиця 1 – Структура контурів механізму приводу ПНВТ у базовому варіанті

	Контур $C_5B_5A_3O_5C_5$	Контур $C_5D_3E_3F_5C_5$
	$n = 3; P_5 = 3; P_3 = 1$	$n = 3; P_5 = 2; P_4 = 0; P_3 = 2$
f	$f_1 = 1P_5 + 2P_4 + 3P_3 + 4P_2 + 5P_1 = 1 \times 3 + 2 \times 0 + 3 \times 1 + 4 \times 0 + 5 \times 0 = 6$	$f_2 = 1P_5 + 2P_4 + 3P_3 + 4P_2 + 5P_1 = 1 \times 2 + 2 \times 0 + 3 \times 2 + 4 \times 0 + 5 \times 0 = 8$
W	$W = N - r_1 = 6 - 4 = 2;$ $W = W_o + W_m = 1 + 1 = 2$	$W = N - r_2 = 8 - 6 = 2;$ $W = W_o + W_m = 1 + 1 = 2$
q	$q_{CM1} = W + 5P_5 + 4P_4 + 3P_3 + 2P_2 + P_1 - 6n = 2 + 5 \times 3 + 4 \times 0 + 3 \times 1 + 2 \times 0 + 0 - 6 \times 3 = 2$	$q_{CM2} = W + 5P_5 + 4P_4 + 3P_3 + 2P_2 + P_1 - 6n = 2 + 5 \times 2 + 4 \times 0 + 3 \times 2 + 2 \times 0 + 0 - 6 \times 3 = 0$
	$q_{Oz1} = W + 6 - f = 2 + 6 - 6 = 2$	$q_{Oz2} = W + 6 - f = 2 + 6 - 8 = 0$
$q = q_1 + q_2 = 2 + 0 = 2$		

Таблиця 2 – Застосування поконтурного методу до механізму приводу ПНВТ у базовому варіанті

Контур	Плaskі рухомості f_n	Неплaskі рухомості f_n
	$C_5B_5A_3O_5C_5$	$f'_x \quad f'_y \quad f''_z$
$C_5D_3E_3F_5C_5$		
$W = 3, q = 2$		

Отже, всі наявні надлишкові зв'язки знаходяться в першому незалежному контурі $C_5B_5A_3O_5C_5$. Самоустановку механізму унеможливилює відсутність у наявних кінематичних пар двох рухомостей - поворотів навколо осей X та Y (f'_x, f'_y). Таким чином, для виключення надлишкових зв'язків необхідно в контур $C_5B_5A_3O_5C_5$ додати дві відсутні рухомості за рахунок підвищення класу наявних кінематичних пар, або застосування кінематичних з'єднань.

Одним із варіантів виключення надлишкових зв'язків є модифікування поверхні катання ролика шляхом надання йому бочкоподібної форми (варіант I), що дозволить підвищити клас кінематичної пари A з третього до п'ятого, ввівши таким чином необхідні рухомості без збільшення кількості ланок чи зміни конструкції деталей. В такому випадку кінематична схема механізму набуде вигляду, показаного на рис. 3.

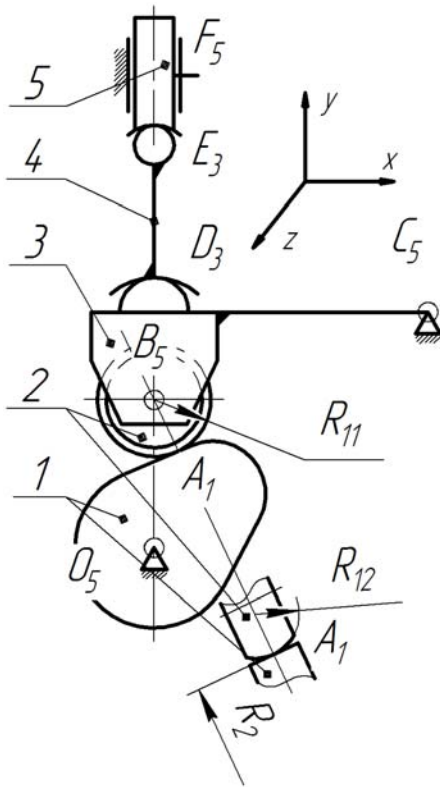


Рисунок 3 – Структурна схема механізму приводу ПНВТ у пропонуваному варіанті I

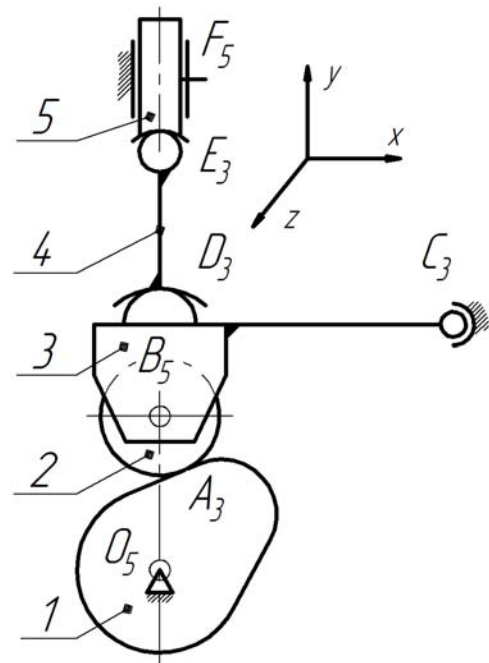


Рисунок 4 – Структурна схема механізму приводу ПНВТ у пропонуваному варіанті II

У випадку модифікації поверхні катання ролика кількість кінематичних пар п'ятого класу становитиме $P_5 = 4$ (O_5, B_5, C_5, F_5), кількість кінематичних пар четвертого та другого класів $P_4 = P_2 = 0$, кількість кінематичних пар третього класу $P_3 = 2$ (D_3, E_3), крім цього з'явиться одна кінематична пара першого класу $P_1 = 1$ (A_1).

В такому випадку сума рухомостей кінематичних пар:

$$f = 1P_5 + 2P_4 + 3P_3 + 4P_2 + 5P_1 = \\ = 1 \times 4 + 2 \times 0 + 3 \times 2 + 4 \times 0 + 5 \times 1 = 15.$$

Ступінь рухомості механізму:

$$W = N - \sum r_i = 15 - (6 + 6) = 3,$$

де $N = 15$ – кількість однорухомих кінематичних пар; $r_i = 6$ – ранг осей незалежного контура $C_5B_5A_1O_5C_5$ в новому варіанті (осі його кінематичних пар довільно розташовані в просторі).

Кількість надлишкових зв'язків механізму в новому варіанті I:

$$q_{CM} = W + 5P_5 + 4P_4 + 3P_3 + 2P_2 + P_1 - 6n = \\ = 3 + 5 \times 4 + 4 \times 0 + 3 \times 2 + 2 \times 0 + 1 - 6 \times 5 = 0,$$

$$q_{O3} = W + 6k - f = 3 + 6 \times 2 - 15 = 0.$$

Застосування поконтурного методу (табл. 3) ілюструє яким чином запропоноване удосконалення виключає в механізмі надлишкові зв'язки.

Таблиця 3 – Застосування поконтурного методу до механізму приводу ПНВТ у запропонованому варіанті I

Контур	Плaskі рухомості f_n	Неплaskі рухомості f_n
$C_5B_5A_1O_5C_5$		
$C_5D_3E_3F_5C_5$		
$W = 3, q = 0$		

Аналогічний резерв виключення надлишкових зв'язків дає оснащення важеля сферичною опорою C (рис. 4) (варіант II) в місці сполучення з блоком. Це дає можливість підвищити клас кінематичної пари C із п'ятого до третього. При цьому кількість кінематичних пар п'ятого класу становитиме $P_5 = 3$ (O_5, B_5, F_5), кількість кінематичних пар четвертого та другого класів $P_4 = P_2 = 0$, кількість кінематичних пар третього класу $P_3 = 4$ (A_3, C_5, D_3, E_3). Загальна кількість кінематичних пар та кількість рухомостей при цьому будуть аналогічні попередньому варіанту.

Кількість надлишкових зв'язків механізму в новому варіанті II:

$$q_{CM} = W + 5P_5 + 4P_4 + 3P_3 + 2P_2 + P_1 - 6n = \\ = 3 + 5 \times 3 + 4 \times 0 + 3 \times 4 + 2 \times 0 + 0 - 6 \times 5 = 0, \\ q_{O3} = W + 6k - f = 3 + 6 \times 2 - 15 = 0.$$

Застосування поконтурного методу для варіанту II ілюструється табл. 4.

Таблиця 4 – Застосування поконтурного методу до механізму приводу ПНВТ у запропонованому варіанті II

Контур	Плaskі рухомості f_n	Неплaskі рухомості f_n
$C_5B_5A_3O_5C_5$		
$C_5D_3E_3F_5C_5$		
$W = 3, q = 0$		

Очевидно, що варіант удосконалення II можливо застосовувати головним чином при створенні нових двигунів, оскільки це потребує зміни конструкції важеля. Що ж стосується оцінки можливості застосування варіанту I для модернізації експлуатованих машин, то на першому етапі, наближено, проілюструємо її розрахунком контактних напружень в парі «паливний кулак-ролик» двигуна МаК М43 у випадку виконання поверхні катання останнього бочкоподібної форми.

Для цього перетворюємо відомий вираз для контактних напружень [14] для загального випадку контакту двох тіл, і подаємо його у вигляді:

$$\sigma_{H6} = \frac{0,478F^{1/3}}{\alpha\beta \left[\frac{3(1-\mu^2)}{E(1/R_{11} + 1/R_{12} + 1/R_2)} \right]^{2/3}},$$

де F – зусилля, що передається паливним кулаком на ролик і створює контактні напруження в зоні контакту їх поверхонь; μ – коефіцієнт Пуассона; E – зведений модуль пружності матеріалів ролика та паливного кулака; R_{11} – радіус ролика; R_{12} – радіус поверхні катання ролика; R_2 – радіус робочої поверхні паливного кулака; α, β – коефіцієнти.

Коефіцієнти α і β обчислюватимемо за наведеними нижче виразами, що із достатньою точністю ($R^2 = 0,998$) апроксимують наявні табличні дані:

$$\alpha = 62,19\psi^{-0,9143};$$

$$\beta = 0,3559e^{0,0116\psi},$$

де допоміжний кут ψ обчислюється за виразом:

$$\cos\psi = \frac{\sqrt{(1/R_{11} - 1/R_{12})^2 + 1/R_2^2 + 2(1/R_{11} - 1/R_{12})/R_2}}{1/R_{11} + 1/R_{12} + 1/R_2}.$$

Визначення контактних напружень σ_{H6} (з використанням вихідних даних, отриманих шляхом замірів на двигуні, та розрахунків: $R_{11} = 65$ мм, $R_2 = 40$ мм, $F \approx 72500$ Н (при тиску відкриття форсунки 47 МПа), $\mu = 0,3$, $E = 2,12 \times 10^5$ МПа) виконано шляхом розрахунків та виконання моделювання в середовищі SolidWorks (рис. 5). Окремо за відомими залежностями [15] для стиску циліндрів були обчислені контактні напруження в базовому варіанті виконання ролика, коли поверхня його катання виконана циліндричною – $\sigma_{Hц} = 1625$ МПа. Результати розрахунку представлені у вигляді графіка (рис. 6) в координатах $K_1 - K_2$ ($K_1 = R_{12} / R_{11}$; $K_2 = \sigma_{H6} / \sigma_{Hц}$).

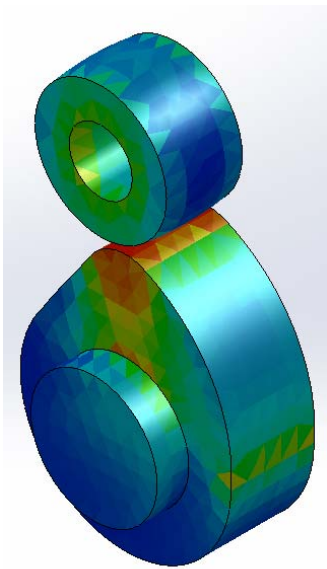


Рисунок 6 –
Напружений стан
деталей пари «паливний
кулак – ролик»
(SolidWorks)

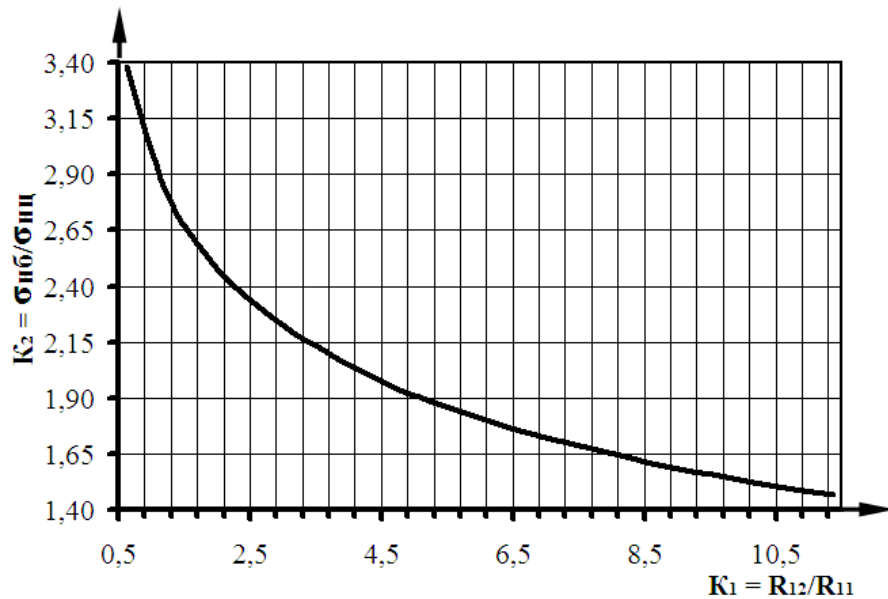


Рисунок 5 – Графік залежності контактних напружень в парі «паливний кулак-ролик» від співвідношення радіусів ролика та його робочої поверхні

Дані графіка доводять можливість досягнення прийнятних значень контактних напружень на рівні 2000...2200 МПа [2] при застосуванні бочкоподібних роликів. Звичайно, більш упевнено стверджувати про можливість модифікації поверхонь роликів експлуатованих двигунів можна в результаті виконання: а) розрахунків ресурсу ролика та підшипникової втулки, подібно до того як це зроблено для зубчастих передач [13, 15]; б) виконання лабораторних та натурних випробувань.

В результаті виконаних теоретичних досліджень можна зробити наступні **висновки**:

- внаслідок недосконалості конструкції приводу ПНВТ суднового дизеля МаК М43, а саме наявності в його механізмі надлишкових зв'язків за присутності перекосу осей ролика та паливного кулака виникає концентрація навантаження біля краю підшипникової втулки ролика, що стає причиною її руйнування. Надлишкові зв'язки унеможливають самоустановку ролика по кулачку, а відтак рівномірний розподіл навантаження по довжині підшипникової втулки;

- в результаті структурного аналізу механізму приводу ПНВТ показано, що він містить два надлишкових зв'язки, які обидва розташовані в контурі, що обмежений важелем, роликом та паливним кулаком і являють собою обмеження поворотів навколо осей X та Y ;

- виключення надлишкових зв'язків забезпечується додаванням двох рухомостей у зазначений контур, чого можна досягти наданням поверхні катання ролика бочкоподібної форми (варіант *I*), або сполученням важеля з блоком дизеля за рахунок сферичної опори (варіант *II*);

- показано, що раціональним вибором співвідношення радіусів ролика та його бочкоподібної поверхні катання можна досягти допустимих значень контактних напружень в парі «паливний кулак-ролик», що ілюструє резерви застосування варіанту *I* для застосування на двигунах, що знаходяться в експлуатації;

- варіант *II* має резерв для використання при створенні нових конструкцій дизелів, оскільки потребує значної зміни конструкції важеля та його опори.

Перспективи подальших досліджень можна окреслити наступними напрямками:

- обґрунтування параметрів ролика з модифікованою поверхнею катання з

урахуванням довговічності власне цієї поверхні та підшипникової втулки. Обґрунтування параметрів рівномічних ролика та втулки;

- обґрунтування параметрів сферичної опори важеля;
- аналіз можливостей самоустановки важеля в складеному механізмі приводу;
- співставлення можливих варіантів конструкції механізму без надлишкових зв'язків на основі функціонально-вартісного аналізу;
- визначення картини розподілу тисків та незворотних втрат на тертя у підшипнику ковзання в умовах наявності кутового зміщення осей втулки та шипа.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Сагін С. В. Теорія і практика енергоперетворення на судах з мінімально неминучими незворотними втратами: дис. ... д-ра техн. наук: спец. 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту; Національний університет «Одеська морська академія». Одеса, 2019. 402 с.
2. Макушев Ю. П., Михайлова Л. Ю. Расчетное определение рациональной компоновки привода насоса 6ТН9×10Т. *Актуальные проблемы развития и эксплуатации поршневых двигателей в транспортном комплексе Азиатско-Тихоокеанского региона : материалы конференции (15-19 сентября 2008 г.)* Хабаровск. 2008. С. 229–238.
3. Троицкий А. В. Моделирование работы топливного насоса высокого давления судового дизеля с учетом силового взаимодействия его элементов. *Вестник Астраханского государственного технического университета. Морская техника и технология*. Астрахань, 2010. № 02 С. 129–133.
4. Журавльов Ю. І., Богач Ю. М. Дослідження впливу енергетичних витрат при зношуванні в процесі експлуатації сполучень «вал – підшипник ковзання». *Судовые энергетические установки: научно-технический сборник*. Вып. 37. Одеса : ОНМА, 2017. С. 62–73.
5. Решетов Л. Н. Самоустанавливающиеся механизмы. Москва : Машиностроение, 1991. 288 с.
6. Pogrebnyak R. P. Structural analysis and rational design parallelogram arm gripping device. *Теория и практика металлургии*. 2015. № 1–2. С. 123–125.
7. Погребняк Р. П. Структурний аналіз та кінематичний синтез спареного стрижньового кулісного механізму захвата робота. *Підйомно-транспортна техніка : науково-технічний та виробничий журнал*. Одеса : Інтерпрінт, 2017. № 4 С. 57–66.
8. Atarer F., Korkmaz K., Kiper G. (2017). Design alternatives of network of Altmann linkages. *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*, 5(4), 495–503.
9. Sydorenko I., Kravtsov E., Prokopovych I., Korolkova M., Dmitrieva S. Reducing the reliability of equipment as a result of the reduction of the culture of production. *Праці Одеського політехнічного університету*. 2019. Вип. 3(59). 2019. Вип. 3(59). С. 5–13.
10. Самойленко Л. К., Проценко В. О. Про структуру механізму колодкового гальма і підвищення його надійності. *Науковий вісник Херсонського державного морського інституту*. Херсон : ХДМІ. 2010. № 2 (3) С. 211–216.
11. Проценко В. О., Самойленко Л. К., Бабій М. В. Аналіз відмов та напрямки удосконалення відцентрових муфт сепараторів судових енергетичних установок. *Підйомно-транспортна техніка : науково-технічний та виробничий журнал*. Одеса : Інтерпрінт. 2016. № 3 С. 59–71.
12. Теория механизмов и механика машин / К.В. Фролов и др. Москва : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 566 с.
13. Машнев М. М., Красковский Е. Я., Лебедев П. А. Теория механизмов и машин и детали машин. Ленинград : Машиностроение, 1980. 512 с.
14. Старовойтов Э. И. Соппротивление материалов. Москва : Физматлит, 2008. 384 с.

15. Павлище В.Т., Харченко Є. В., Барвінський А. Ф., Гаршнєв Ю. Г. Прикладна механіка / за ред. В.Т. Павлище. Львів : Інтеллект-Захід, 2004. 386 с.

REFERENCES

1. SagIn S. V. (2019). *Teoriya i praktika energoperetvorenniya na sudnah z minimalno neminuchimi nezvorotnimi vtratami*: dis. ... d-ra tehn. nauk: spets. 05.22.20 – ekspluatatsiya ta remont zasobiv transportu; Natsionalniy unіversitet «Odeska morskа akademiya». Odesa : ONMA, 402 p.
2. Makushev Yu. P. Mihajlova L. Yu. (2008). Raschetnoe opredelenie racionalnoj komponovki privoda nasosa 6TN9×10T. *Aktualnye problemy razvitiya i ekspluatatsii porshnevnyh dvigatelej v transportnom komplekse Aziatsko-Tihookeanskogo regiona*. Habarovsk, 229–238.
3. Troickij A. V. (2010). Modelirovanie raboty toplivnogo nasosa vysokogo davleniya sudovogo dizelya s uchetom silovogo vzaimodejstviya ego elementov. *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Morskaya tehnika i tehnologiya*. Astrahan, 02, 129–133.
4. Zhuravlov Yu. I, Bogach Yu. M. (2017). Doslidzhennya vplivu energetichnih vitrat pri znoshuvanni v procesi ekspluatatsiyi spoluchen «val–pidshipnik kovzannya». *Sudovye energeticheskie ustanovki: nauchno-tehničeskij sbornik*. Odesa : ONMA, 37, 62–73.
5. Reshetov L. N. (1991). Samoustanavlivayushiesya mehanizmy. Moscow : Mashinostroenie.
6. Pogrebnyak R. P. (2015). Structural analysis and rational design parallelogram arm gripping device. *Teoriya i praktika metallurgii*, 1-2, 123–125.
7. Pogrebnyak R. P. (2017). Strukturnij analiz ta kinematičnij sintez sparenogo strizhnovogo kulisnogo mehanizmu zahvata robota. *Pidjomno-transportna tehnika*. Odesa : Interprint, 57–66.
8. Atarer F., Korkmaz K., Kiper G. (2017). Design alternatives of network of Altmann linkages. *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*, 5(4), 495–503.
9. Sydorenko I., Kravtsov E., Prokopovych I., Korolkova M., Dmitrieva S. (2019). Reducing the reliability of equipment as a result of the reduction of the culture of production. *Praci Odeskogo politehničnogo universitetu*, Odesa : ONPU, 3 (59), 5–13.
10. Samojlenko L. K., Procenko V. O. (2010). Pro strukturu mehanizmu kolodkovogo galma i pidvishennya jogo nadijnosti. *Naukovij visnik Hersonskogo derzhavnogo morskogo institutu*. Kherson : HDMI, 2 (3), 211–216.
11. Procenko V. O., Samojlenko L. K., Babij M. V. (2016). Analiz vidmov ta napryamki udoskonalennya vidcentrovih muft separatoriv sudnovih energetichnih ustanovok. *Pidjomno-transportna tehnika*. Odesa : Interprint, 3, 59–71.
12. Frolov K. V. (2017). Teoriya mehanizmov i mehanika mashin. Moscow : Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana.
13. Mashnev M. M., Kraskovskij E. Ya., Lebedev P. A. (1980). Teoriya mehanizmov i mashin i detali mashin. Leningrad : Mashinostroenie.
14. Starovojtov E.I. (2008) Soprotivlenie materialov. Moscow : Fizmatlit.
15. Pavlishe V. T., Harchenko Ye. V., Barvinskij A. F., Garshnyev Yu. G. (2004). *Прикладна механіка*. Lviv : Intelekt-Zahid, 2004.

Проценко В. А., Бабий М. В., Настасенко В. А., Маринченко Д. О. Мартышевский Д. А. АНАЛИЗ ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ОТКАЗОВ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИВОДА ТОПЛИВНОГО НАСОСА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ МАК М43

Целью исследования является установление возможностей снижения чувствительности привода топливного насоса высокого давления (ТНВД) судового дизеля к погрешностям изготовления и монтажа деталей за счет ликвидации избыточных связей в его механизме. Проанализирована структура механизма привода ТНВД дизеля МАК М43, за счет чего установлено, что вследствие несовершенства конструкции привода, а именно наличия в его механизме избыточных связей, в

присутствии перекоса осей ролика и топливного кулака возникает концентрация нагрузки у края подшипниковой втулки ролика, становящаяся причиной ее разрушения. Избыточные связи делают невозможной самоустановку ролика по кулачку, а также равномерное распределение нагрузки по длине подшипниковой втулки. В результате структурного анализа механизма привода ТНВД показано, что он содержит две избыточные связи, обе расположены в контуре, ограниченном рычагом, роликом и топливным кулаком и представляют собой ограничения поворотов вокруг осей X и Y. Исключение избыточных связей обеспечивается добавлением двух подвижностей в указанный контур, чего можно достичь выполнением поверхности катания ролика бочкообразной формы (вариант I), или соединением рычага с блоком дизеля за счет сферической опоры (вариант II). Показано, что оптимальным выбором соотношения радиусов ролика и его бочкообразной поверхности катания можно достичь допустимых значений контактных напряжений в паре «топливный кулак-ролик», иллюстрирующий резервы применения варианта I для применения на двигателях, находящихся в эксплуатации. Вариант II имеет резерв для использования при создании новых конструкций дизелей, поскольку требует значительного изменения конструкции рычага и его опоры. Предложены направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: судовой дизель; топливный насос высокого давления; топливный кулак; избыточные связи; контактные напряжения.

Protsenko V.O., Babiy M.V., Nastasenko V.O., Martyshevskiy D.O. ANALYSIS OF THE OPERATIONAL FAILURES REASONS OF MARINE DIESEL MAK M43 FUEL INJECTION PUMP DRIVE ELEMENTS

The aim of the study is to establish the possibility of reducing the sensitivity of the drive of a fuel injection pump (FIP) of a marine diesel engine to manufacturing and assembly errors due to the elimination of excess connections in its mechanism. The structure of the drive mechanism of the MAK M43 diesel engine FIP is analyzed, due to which it is established that due to imperfections in the drive design, namely the presence of excessive links in its mechanism, in the presence of a skew axis of the roller and the fuel cam, a load concentration occurs at the edge of the roller bearing sleeve, which causes its destruction. Excessive connections make it impossible to self-align the roller on the cam, as well as the uniform distribution of the load along the length of the bearing sleeve. As a result of a structural analysis of the injection pump drive mechanism, it is shown that it contains two redundant connections, both located in a circuit bounded by a lever, a roller and a fuel fist and represent rotation restrictions around the X and Y axes. Excessive connections are eliminated by adding two mobilities to the specified circuit, what can be achieved by fulfilling the rolling surface of a barrel-shaped roller (variant I), or by connecting the lever to the diesel unit due to the spherical support (variant II). It has been shown that by the optimal choice of the ratio of the radii of the roller and its barrel-shaped rolling surface, it is possible to achieve acceptable values of contact stresses in the "fuel fist-roller" pair, illustrating the reserves of the application of variant I for use on engines in operation. Variant II has a reserve for use in creating new diesel designs, since it requires a significant change in the design of the lever and its support. Directions for further research are proposed.

Key words: marine diesel; fuel injection pump; fuel cam; excessive connections; contact stresses.

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОЧИЩЕННЯ ОХОЛОДЖУВАЧА ПРОДУВНОГО ПОВІТРЯ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГУНА

Самарін О. Є., к.т.н., доцент кафедри експлуатації суднових енергетичних установок Херсонської державної морської академії, e-mail: samarin162@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2690-7298;

Врублевський Р. Є., к.т.н., доцент кафедри експлуатації суднових енергетичних установок Херсонської державної морської академії, e-mail: amor-vr@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8686-3488

Зниження температури продувного повітря відбувається в охолоджувачі повітря. З часом його продуктивність падає через забруднення елементів теплообміну. Це призводить до зниження потужності дизельного двигуна. Відома процедура очищення повітроохолоджувача не забезпечує повного очищення теплообмінних елементів, особливо у важкодоступних місцях, а ручне механічне очищення є трудомістким і вимагає зупинки двигуна на тривалий час. Отже, підвищення ефективності і зниження трудомісткості очищення охолоджувача повітря є актуальним завданням.

З метою зменшення вказаних недоліків пропонується модернізувати систему очищення охолоджувача повітря у такий спосіб, щоб розпилювальні пристрої було встановлено додатково з обох боків охолоджувального елемента, тобто у місцях найбільшого забруднення охолоджувача.

Підвищення температури продувного повітря призводить до зменшення потужності двигуна, збільшення витрати палива і накопичення відкладень у випускному колекторі і газоході, що може викликати пожежу.

Враховуючи необхідність регулярних чисток охолоджувального елемента, серійна система є трудомісткою. Крім очищення через розпилювачі, вона передбачає систематичне розбирання охолоджувача і ручне очищення елементів.

Запропонована модернізація дозволяє підвищити ефективність очищення охолоджувача продувного повітря дизельного двигуна завдяки встановленню додаткових розпилювачів мийної рідини біля бокових поверхонь охолоджувального елемента.

Модернізація не складна і її впровадження можливе на діючих судах силами машинної команди при довгостроковій зупинці судна для технічного обслуговування і проведення ремонту.

Рішення є універсальним і може бути запроваджене на судах з двигунами, що мають газотурбінний наддув з охолодженням продувного повітря.

Застосування модернізованої системи дозволить також зменшити трудомісткість очищення охолоджувальних елементів повітроохолоджувача завдяки відмові від ручного механічного очищення важкодоступних поверхонь охолодження.

Ключові слова: продувне повітря, охолоджувач, охолоджувальний елемент, розпилювач.

DOI: 10.33815/2313-4763.2020.1.22.120-130

Вступ. В основі роботи дизеля лежить перетворення енергії спалюваного палива в механічну роботу, тому, чим більше спалено палива, тим більшу роботу зможе розвинути двигун. Але кількість палива, яке може ефективно згоріти в циліндрах заданого розміру, лімітується масою розміщеного в них заряду повітря [1].

Для збільшення маси заряду повітря потрібно збільшити його щільність. Також щільність повітря може бути збільшена, якщо підняти тиск повітря і знизити його температуру. Таке технічне рішення, яке дозволяє підвищити агрегатну потужність двигуна завдяки збільшенню циклової подачі палива і заряду повітря за практично незмінного коефіцієнта надлишку повітря, називається наддувом. У сучасних конструкціях двигунів ступінь наддуву досягнув 3,5–3,8 (двотактні) і 4,5–4,9 (чотиритактні).

Зниження температури продувного повітря відбувається в охолоджувачі повітря. З часом його продуктивність падає через забруднення елементів теплообміну. Це призводить до зниження потужності дизельного двигуна. Відома процедура очищення повітроохолоджувача не забезпечує повного очищення теплообмінних елементів, особливо у важкодоступних місцях, а ручне механічне очищення є трудомістким і вимагає зупинки двигуна на тривалий час.

Отже, підвищення ефективності і зниження трудомісткості очищення охолоджувача повітря є актуальним завданням.

Система продувного повітря двигунів модельного ряду МС 50-98 фірми MAN B&W. У суднових двигунах модельного ряду МС 50-98 фірми MAN B&W застосовується газотурбінний наддув. Стиснення повітря від атмосферного тиску до тиску наддуву p_k здійснюється в наддувочному агрегаті, що являє собою відцентровий компресор, об'єднаний з газовою турбіною. У турбіні, що встановлена у випускному тракті двигуна, використовується значна частина енергії випускних газів, яка у двигунах без наддуву зазвичай втрачається в атмосферу. Оскільки привід компресора здійснюється турбіною, зникає потреба у відборі потужності від двигуна. Важливо також мати на увазі, що при газотурбінному наддуванні із зростанням тиску p_k потужність механічних втрат не змінюється, а індикаторна потужність збільшується. В результаті механічний ККД двигуна зростає, а питома ефективна витрата палива відповідно знижується [2].

Продувне повітря у двигун подається від одного або двох турбонагнітачів, розташованих на стороні випуску [3, 4]. Як варіант, турбонагнітач може бути встановлений у кормовій частині двигуна.

Випускний газ двигуна приводить у дію турбіну турбонагнітача, а через загальний вал турбіна приводить у дію компресор.

Компресор забирає повітря з машинного відділення через повітряні фільтри. З компресора повітря проходить через трубу продувного повітря в повітроохолоджувач (рис. 1), де повітря охолоджується. Труба продувного повітря з компенсатором ізолювана і може бути покрита зсередини шумопоглинальним матеріалом.

Охолоджувач повітря сконструйований так, що він відокремлює конденсат від самого повітря.

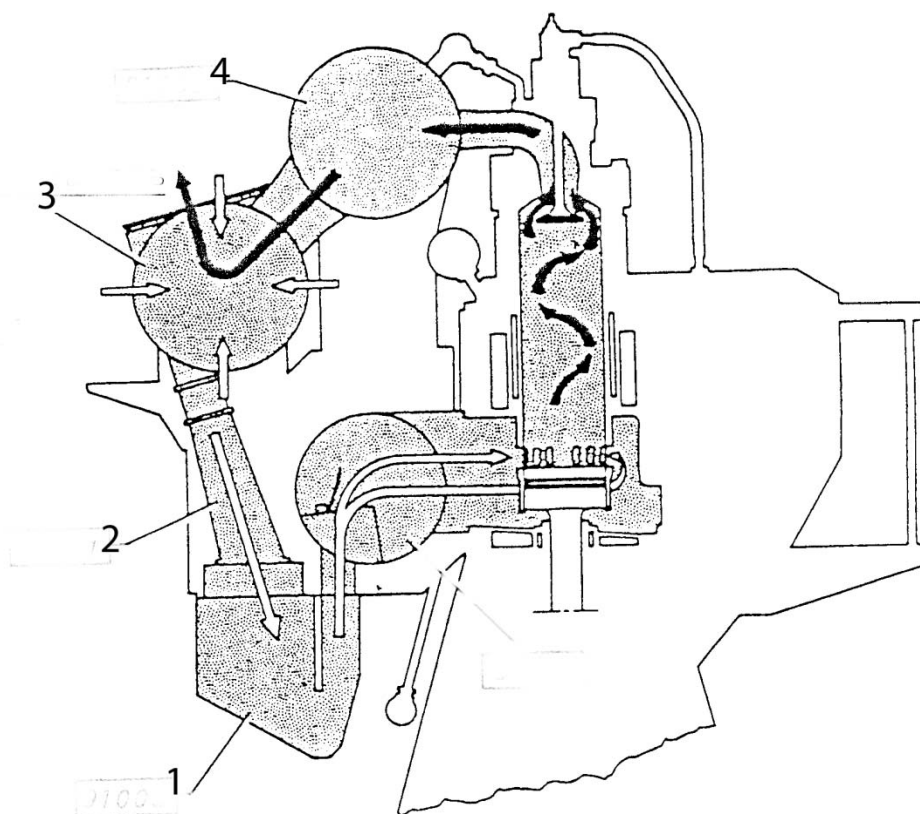


Рисунок 1 – Схема системи продувного повітря:

1 – охолоджувач повітря; 2 – система продувного повітря; 3 – турбонагнітач; 4 – випускний колектор

Повітря нагнітається в ресивер продувного повітря через блок клапанів, установлений внизу ресивера. Блок клапанів має кілька неповоротних клапанів, які відкриваються під тиском повітря від турбонагнітача.

З продувного ресивера повітря надходить у циліндр через продувні вікна, коли поршень знаходиться в нижньому положенні. Коли випускні клапани відкриті, випускний газ нагнітається в загальний колектор випускних газів, звідки він надходить до турбіни турбонагнітача при постійному тиску.

Охолоджувач продувного повітря. Охолоджувальний елемент продувного повітря блочного типу. Він установлений у корпусі, звареному зі сталевих пластин. Корпус охолоджувача забезпечений оглядовими кришками для перевірки стану охолоджувального елемента.

Чищення елементів охолоджувача можна виконувати з або без його виймання при зупиненому двигуні за допомогою вбудованих розпилювачів (рис.2).

Охолоджувач має камеру повороту повітря із вбудованим уловлювачем повітря. Уловлювач складається з низки пластин, які відокремлюють сконденсовану воду продувного повітря під час проходження повітряного потоку [3, 4, 5].

Відсепарована вода збирається на дні корпусу охолоджувача, звідки вона видаляється дренажною системою. Важливо перевіряти правильне функціонування дренажу, так як у циліндр можуть потрапити краплі води. Для цього можна встановити сигнальний пристрій надлишку води.

Забруднення охолоджувача повітря відбувається маслянистими відкладеннями на поверхні трубок з боку повітря, солей і шламу з боку охолоджувальної забортної води. Як наслідок, зростає опір руху повітря, тиск δp_s на холодильнику збільшується. Відомі випадки, коли δp_s збільшувався з 0,001- 0,002 МПа до 0,02 МПа і відповідно знижувався коефіцієнт теплопередачі. При зниженні охолоджувальної здатності холодильника перепад температур повітря ($T_k - T_s$) зменшується, температура повітря T_s в ресивері підвищується. Остання обставина негативно позначається на масовому заряді повітря в циліндрах G_b . Досить сказати, що підвищення температури продувного повітря на 10° викликає скорочення G_b в середньому на 2–3 % [1].

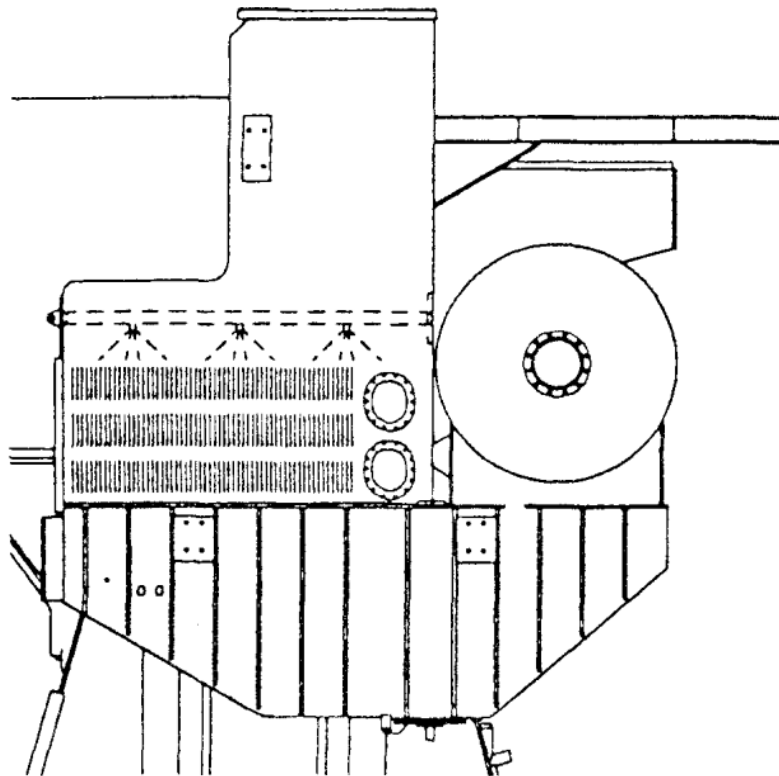


Рисунок 2 – Охолоджувач продувного повітря

Після чищення компресора обов'язково необхідно здійснювати проčiщення водою або мийним розчином повітроохолоджувача, так як у нього заносяться маслянисті відкладення, змиті з колеса компресора.

Виділення невіршених раніше частин загальної проблеми. При експлуатації газотурбінного наддуву найбільш трудомістким є процес його очищення від забруднення, яке необхідно проводити регулярно.

З аналізу роботи нагнітача зрозуміло, що подача продувного повітря в охолоджувач відбувається з одного боку, де й осідає більша частина відкладень. Недоліком такої системи очищення є те, що мийна рідина подається під напором тільки зверху. При цьому бічні та нижня поверхні охолоджувача очищуються гірше, що призводить до зменшення ефективності теплообміну повітроохолоджувача.

Постановка завдання. З метою зменшення вказаних недоліків пропонується модернізувати систему очищення охолоджувача повітря таким чином, щоб розпилювальні пристрої було встановлено додатково з обох боків охолоджувального елемента, тобто у місцях найбільшого забруднення охолоджувача. Така модернізація підвищить ефективність очищення повітряної частини охолоджувача.

Рішення задачі. Після очищення компресора обов'язково необхідно проводити очищення водою або мийним розчином повітроохолоджувача, так як на нього заносяться маслянисті відкладення, що змиваються з колеса компресора.

На серійному охолоджувачі повітря встановлено тільки два розприскувачі, які розміщуються над охолоджувальним елементом і простягаються вздовж нього, як це показано на рис. 3.

Запропонована модернізація передбачає встановлення додаткових розприскувачів з обох боків охолоджувального елемента (рис. 3).

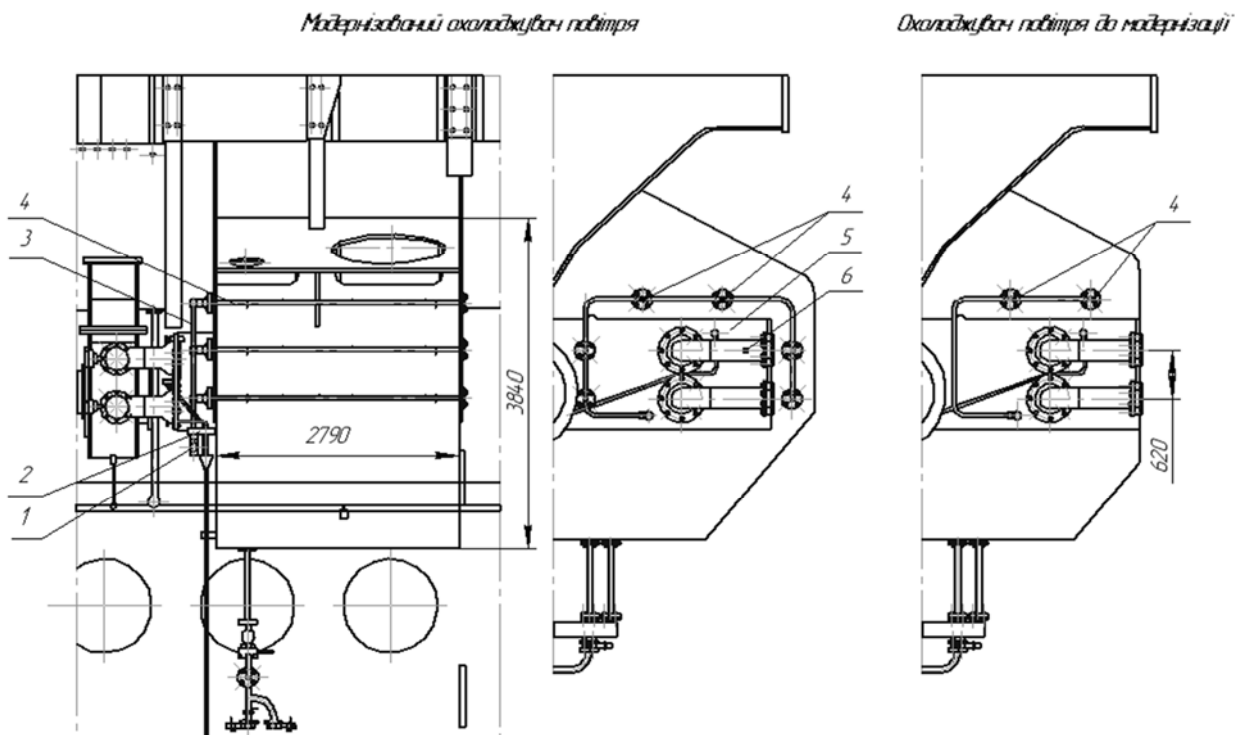


Рисунок 3 – Схема системи чищення охолоджувача продувного повітря до та після модернізації:
 1 – прохідний клапан; 2 – утримувач; 3 – трубопровід подачі мийної рідини; 4 – розпилювач;
 5 – охолоджувальний елемент; 6 – трубопровід подачі охолоджувальної води

Аналіз серійної схеми очищення охолоджувальних елементів показав її недосконалість [8, 9].

Продувне повітря охоплює охолоджувальні елементи з усіх боків. Тому маслянисті відкладення також відкладаються на охолоджувальних елементах з усіх боків, що призводить до утворення на них масляної плівки і погіршення охолодження повітря.

Водночас з тим, розміщені зверху розприскувачі проводять інтенсивне очищення тільки верхньої частини охолоджувального елемента. Його бокові й особливо нижня поверхні не потрапляють під дію напору мийної рідини і можуть омиватися тільки її стоками. З часом це призводить до наростання шару маслянистих відкладень і росту температури продувного повітря.

Загальна кількість розприскувачів збільшується з 8 до 16 одиниць на один охолоджувач.

Площу активного очищення можна розрахувати виходячи з пропорцій бічних і горизонтальних поверхонь охолоджувального елемента. При співвідношенні $a : v = 1 : 1$, де a – площа верхньої горизонтальної площини охолоджувального елемента, а v – сумарна площа двох бічних поверхонь, можна вважати, що площа активного очищення охолоджувального елемента після модернізації зростає на 100 %, що відповідно підвищить ефективність процесу очищення [11].

Запропонована система очищення охолоджувальних елементів дозволить рівномірно очистити їх від бруду і підтримувати необхідну температуру продувного повітря.

Проведення модернізації передбачає виконання додаткових змін у системі повітроохолодження.

Розміщення додаткових розпилювачів з бічної сторони вимагає додаткового місця для їх установа (рис. 3.1). Це досягається збільшенням об'єму камери повітроохолоджувача на величину, достатню для встановлення додаткових розпилювачів.

Крім того, модернізована система очищення передбачає збільшення подачі очищувальної рідини. Тому необхідно передбачити встановлення насоса більшої продуктивності, а також і збільшення ємності для мийної рідини.

Для проходження більшого об'єму рідини необхідно збільшити прохідний перетин гідравлічних трубопроводів.

Попередній аналіз показує, що продуктивність насоса і прохідний перетин трубопроводів необхідно збільшити на 100 %.

Для того щоб не збільшувати продуктивність насоса і перетин трубопроводів можна змінити режим роботи очищувача. Він полягає у поступовому включенні окремих розпилювачів для кожної очищуваної поверхні. Рекомендується спочатку очистити верхню горизонтальну поверхню. Водночас у забруднення частково змиється рідиною повністю, а частково осяде нижче. Потім включаються по черзі розпилювачі однієї сторони охолоджувального елемента, а потім з другої сторони. Отже, збільшується час очищення, але продуктивність насоса і перерізи трубопроводів не змінюються.

Чищення повітряної частини охолоджувача промиванням водою з додаванням хімічних засобів. Чищення проводити тільки при зупиненому двигуні. Це необхідно тому, що уловлювач не може зберегти очищувальну рідину і виникає ризик нагнітання в циліндри очищувального середовища, що може викликати надмірне зношення втулки.

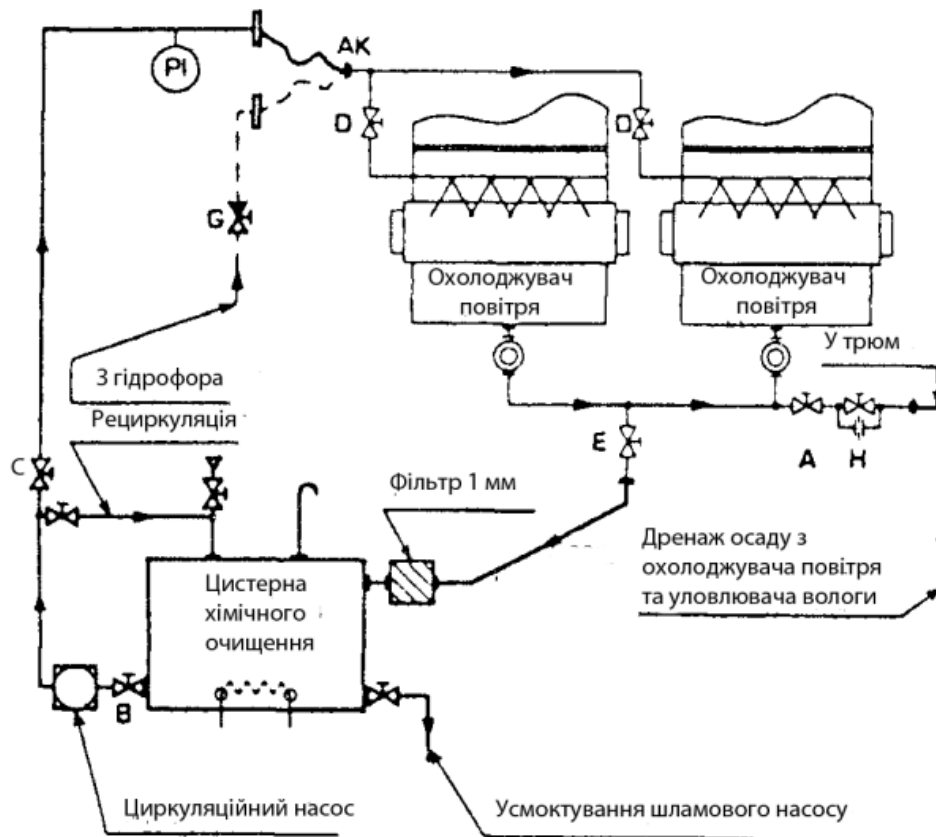
Очищення повітряної сторони охолоджувача продувного повітря здійснюється шляхом уведення хімічної рідини до розпилювача, що встановлений на повітряній камері.

Забруднена хімічними мийними засобами рідина повертається через фільтр до резервуара для хімічного очищення.

Для нормальної роботи охолоджувача необхідно регулярно очищати водяну та повітряну частини охолоджувача [11, 12]. Охолоджувальні блоки повітряної частини забруднюються відкладеннями масла, продуктами неповного згорання, тому для їх

очищення встановлена спеціальна система, що дозволяє проводити очищення без розбирання, як показано на рис. 4.

Охолоджувальні блоки очищуються впорскуванням хімічної рідини через труби, встановлені у повітряній камері.



Умова чищення

Хімічне чищення
Відкрити В, С, D, E, F
Закрити А, G, H
Запустити насос

Промивання водою

Відкрити А, D, G, H
Закрити В, С, E, F

Умова нормальної роботи

Відкрити А
Закрити В, С, D, E, F, G, H
Закрити оглядові кришки
на ресивері продувного повітря

Рисунок 4 – Схема системи очищення повітряної сторони

Рекомендується використовувати одну з наступних очищувальних рідин або аналогічний продукт.

- продукт: АСС 9, вироблений Drew Chemical Corp., Нью-Йорк, США;
- продукт: 80В, виробляється Vecom Int., Maassluis, Голландія.

При очищенні повітряної частини охолоджувача (кормовий кінець) необхідно виконати наступні дії [11, 14]:

1. Не починати очищення, поки двигун не буде в стані спокою близько 30 хвилин. Не відключати подачу стисненого повітря до випускного клапана.

2. Для забезпечення задовільного розпилення очищувальної рідини тиск у циркуляційному насосі має бути не менше 0,07 МПа.

3. Продовжувати процес очищення щонайменше 30 хвилин. Час залежить від частоти, з якою проводиться очищення і хімічної продукції, що використовується.

4. Після очищення промити охолоджувач чистою водою, поки вода, що з'явилося в оглядовому склі, не буде чистою.

5. Контроль проводити або зі знятою кришкою з верхньої частини охолоджувача, або з демонтованим трубопроводом надувного повітря.

Розрахунок кількості конденсату дренажної системи. Поєднання високої вологості повітря і холодної води охолодження викликає появу конденсату, що відокремлюється від продувного повітря в уловлювачі водяного туману. Кількість конденсату з водяного туману може бути оцінена на основі перерахованих нижче вимірювань і графіків, зображених на рис. 4 [8, 15].

Методика розрахунку. 1. Кількість водяної пари у всмоктуваному повітрі знаходиться на основі вимірів температури навколишнього повітря і відносної вологості, з рис. 4.

2. Максимальна кількість водяної пари в продувному повітрі знаходиться по графіку, побудованому на вимірах тиску повітря і температури.

3. Очікуваний обсяг конденсату розраховується за формулою:

$$M_c = k \times N_e \times (M_a - M_s), \frac{\text{кг}}{200\text{д}}$$

де k – коефіцієнт, що залежить від типу двигуна: $k=1,05$ – для К80...К98; $k=1,0$ – для S50...S90, L50...L70; $k=0,90$ – для S26...S46, L35...L42; N_e – завантаження двигуна, кВт; M_a – кількість водяної пари у всмоктуваному повітрі; M_s – кількість водяної пари у продувному повітрі; допуск результату $\pm 10\%$.

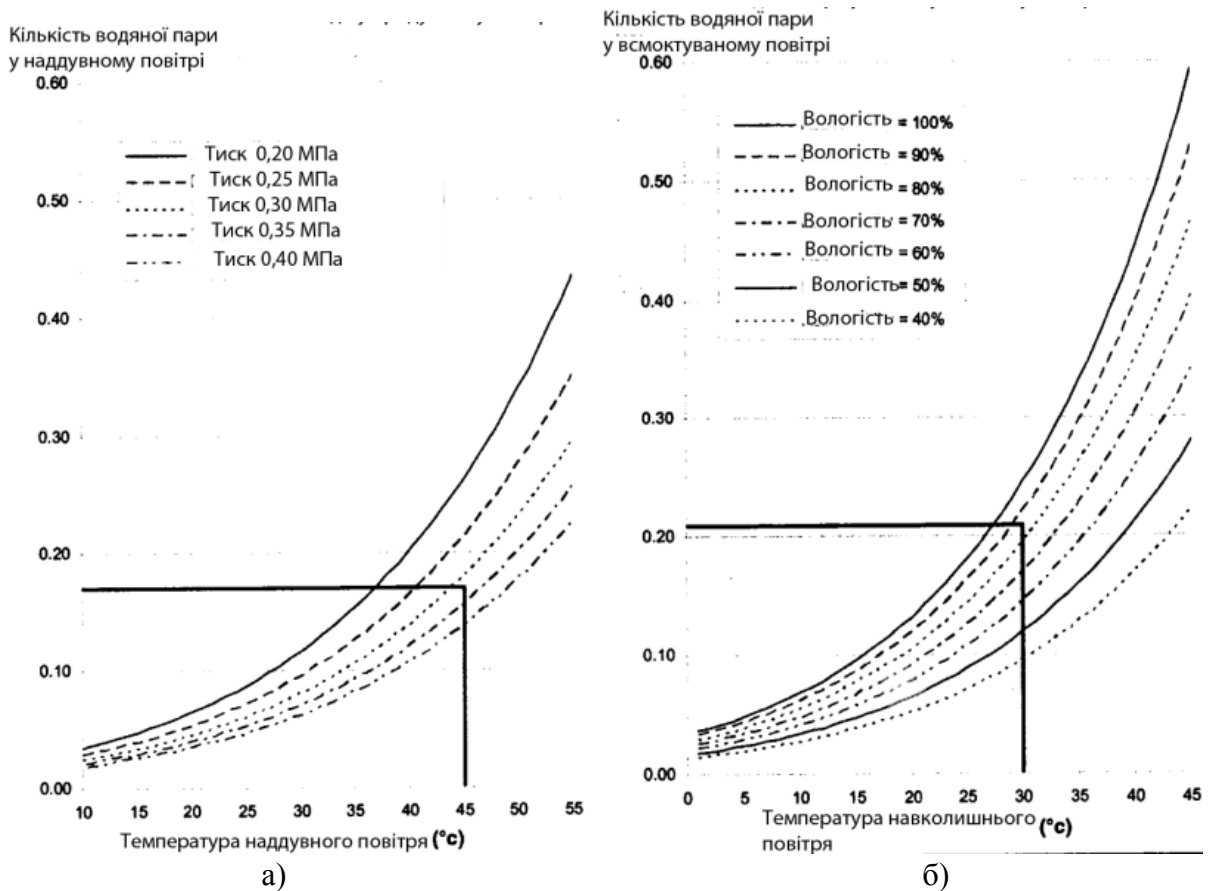


Рисунок 4 – Наявність водяної пари: а) – залежно від вологості повітря; б) – залежно від тиску продувного повітря

Осад конденсату не відбувається, якщо результат негативний. Температура морської води може бути альтернативно використана замість температури повітря та відносної вологості. Крива відносної вологості 100% може застосовуватися, якщо використовується температура морської води.

Розрахунок кількості конденсату. Розрахунок кількості конденсату проведемо для дизеля HYUNDAI-MAN B&W 6L70MC-C.

Вихідні показники [8]:

- | | |
|--|---------------------------|
| – тип двигуна | HYUNDAI-MAN B&W 6L70MC-C; |
| – навантаження двигуна | 19620 кВт |
| – температура навколишнього повітря | 30°; |
| – відносна вологість | 85%; |
| – тиск повітря | 0,325 МПа; |
| – температура продувального повітря | 45°С; |
| – $M_a = 0,21$ кг / кВт×год, знайдено на рис. 4 а; | |
| – $M_c = 0,17$ кг / кВт×год, знайдено на рис. 4 б; | |
| – $k = 1,0$ – для двигуна типу L70. | |

Після підстановки значень у рівняння отримаємо:

$$M_c = 1,0 \times 19620 \times (0,21 - 0,17) = 785 \text{ кг/год.}$$

Кількість конденсату становитиме 785 кг/год ($\pm 10\%$) або 18,8 т/добу для двигуна HYUNDAI-MAN B&W 6L70MC-C.

Після модернізації кількість конденсату не зміниться, оскільки не змінюються параметри роботи охолоджувача повітря – кількість продувального повітря і кількість прокачуваної охолоджувальної води. Але зміниться якість процесу охолодження. Якісне очищення повітроохолоджувача дозволить утримувати показники щільності продувального повітря на заданому і стабільному рівні.

Основні результати та висновки. Підвищення температури продувального повітря призводить до зменшення потужності двигуна, збільшення витрати палива і накопичення відкладень у випускному колекторі й газоході, що може спричинити пожежу.

Враховуючи необхідність регулярних чищень охолоджувального елемента, серійна система є трудомісткою. Крім очищення через розпилювачі, вона передбачає систематичне розбирання охолоджувача і ручне очищення елементів.

Запропонована модернізація дозволяє підвищити ефективність очищення охолоджувача продувального повітря дизельного двигуна завдяки встановленню додаткових розпилювачів мийної рідини біля бокових поверхонь охолоджувального елемента.

Модернізація не складна і її впровадження можливе на діючих судах силами машинної команди при довгостроковій зупинці судна для технічного обслуговування і проведення ремонту. Запропоновані зміни не вимагають значних матеріальних витрат.

Рішення є універсальним і може бути запроваджене на судах з двигунами, що мають газотурбінний наддув з охолодженням продувального повітря. Застосування модернізованої системи дозволить також зменшити трудомісткість очищення охолоджувальних елементів повітроохолоджувача завдяки відмові від ручного механічного очищення важкодоступних поверхонь охолодження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРА

1. Возницький І. В., Пунда А. С. Судовые двигатели внутреннего сгорания. Том 2. М. : Моркнига, 2008. 470 с.
2. Возницький І. В. Современные двухтактные малооборотные двигатели. СПб. : Моркнига, 2006.

3. Возницкий И. В. MAN B&W Двигатели модельного ряда MS 50-98. Конструкция, эксплуатация и техническое обслуживание. М. : Моркнига, 2008. 263 с.
4. Инструкции для дизелей типа 50-98 MS. Компоненты и обслуживание. Издание 8С. Часть 1 MAN B&W Diesel A/S. Копенгаген, Дания. 241с.
5. Инструкции для дизелей типа 50-98 MS. Компоненты и обслуживание. Издание 8С. Часть 2 MAN B&W Diesel A/S. Копенгаген, Дания. 249 с.
6. www.vestas.biz. Vestas aircoil A/S. Technical data for charge air cooler LKMY20/34A4-A-EK-2584. 14 p.
7. Instruction HYUNDAI-MAN B&W Diesel engines operation. 349 p.
8. Инструкции для дизелей типа 50-98 MS. Эксплуатация. Издание 40С. Часть V,VI MAN B&W Diesel A/S. Копенгаген, Дания. 339 с.
9. Судовые энергетические установки / Румб В.К , Яковлев, Г.В., Шаров Г.И. и др. Часть I. Судовые дизельные энергетические установки : учебник. СПб. : СПбМГУ, 2007.
10. Возницкий И. В., Михеев Е. Г. Судовые дизели и их эксплуатация. М. : Транспорт, 1990.
11. Klaus Mollenhauer, Helmut Tschoeke. Handbook of Diesel Engines. Springer-Verlag Berlin: Heidelberg, 2010. 634 p.
12. Holland, P.; Wachtmeister, G.; Eilts, P. Untersuchungen zum Einfluss des Aufladesystems auf das dynamische Verhalten mittelschnellaufender Viertakt-Dieselmotoren. *Proceedings of the 8th AufladetechnischeKonferenz*. Dresden, 2002. P. 31–40.
13. Stutz, W. ; Staub, P.; Mayr, K.; Neuhauser, W.: Neues 2-stufiges Aufladekonzept fur PKW-Dieselmotoren. *Proceedings of the 9th Aufladetechnische Konferenz*. Dresden, 2004. P. 211–228.
14. Meier, E.: Turbocharging Large Diesel Engines – State of the Art and Future Trends. Brochure from ABB Turbo Systems Ltd. Baden (Switzerland) 1994.
15. Friedrich, I.; Pucher, H.: Echtzeit-DVA– Grundlage der Regelung kunftiger Verbrennungsmotoren. *Tagungs-band der MTZ-Konferenz – Motor 2006*. (June 1–2, 2006, Stuttgart) Der Antrieb von morgen, Wiesbaden :Vieweg Verlag, 2006., P. 215–224.

REFERENCES

1. Voznitskii I.V., Punda A.S. Sudovye dvigateli vnutrennego sgoraniia, tom 2: M. MORKNIGA, 2008, - 470s.
2. Voznitskii I.V. Sovremennye dvukhtaktnye malooborotnye dvigateli. SPb.: Morkniga, 2006.
3. Voznitskiy I.V. MAN B&W Dvigateli modelnogo ryada MS 50-98. Konstruktsiya, ekspluatatsiya i tehniceskoe obsluzhivanie. Morkniga, 2008. – 263s.
4. Instruktsii dlya dizeley tipa 50-98 MS. Komponentyi i obsluzhivanie. Izdanie 8S. Chast 1 MAN B&W Diesel A/S. kopengagen, Daniya – 241s.
5. Instruktsii dlya dizeley tipa 50-98 MS. Komponentyi i obsluzhivanie. Izdanie 8S. Chast 2 MAN B&W Diesel A/S. kopengagen, Daniya – 249s.
6. www.vestas.biz. Vestas aircoil A/S. Technical data for charge air cooler LKMY20/34A4-A-EK-2584 . – 14p.
7. Instruction HYUNDAI-MAN B&W Diesel engines operation. 349p.
8. Instruktsii dlya dizeley tipa 50-98 MS. Ekspluatatsiya. Izdanie 40S. Chast V,VI MAN B&W Diesel A/S. Kopengagen, Daniya – 339s.
9. Sudovye energeticheskie ustanovki. Rumb V.K , Iakovlev, G.V., Sharov G.I. i dr. Chast I. Sudovye dizelnye energeticheskie ustanovki: Uchebnik, SPbMGU. – SPb.: 2007.
10. Voznitskii I.V., Mikheev E.G. «Sudovye dizeli i ikh ekspluatatsiia». M.: ransport – 1990.

11. Klaus Mollenhauer, Helmut Tschoeke. Handbook of Diesel Engines. Springer-Verlag Berlin: Heidelberg, 2010. 634 p.
12. Holland, P.; Wachtmeister, G. ; Eilts, P.: Untersuchungen zum Einfluss des Aufladesystems auf das dynamische Verhalten mittelschnellaufender Viertakt-Dieselmotoren. Proceedings of the 8th Aufladetechnische Konferenz Dresden 2002, pp. 31–40.
13. Stutz, W. ; Staub, P.; Mayr, K.; Neuhauser, W.: Neues 2-stufiges Aufladekonzept für PKW-Dieselmotoren. Proceedings of the 9th Aufladetechnische Konferenz Dresden 2004, pp.211–228.
14. Meier, E.: Turbocharging Large Diesel Engines – State of the Art and Future Trends. Brochure from ABB Turbo Systems Ltd. Baden (Switzerland) 1994.
15. Friedrich, I.; Pucher, H.: Echtzeit-DVA– Grundlage der Regelung künftiger Verbrennungsmotoren. Tagungs-band der MTZ-Konferenz – Motor 2006. (June 1 -2, 2006, Stuttgart) Der Antrieb von morgen, Wiesbaden: Vieweg Verlag 2006, pp. 215–224.

Самарин А. Е., Врублевский Р. Е. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ ОХЛАДИТЕЛЯ ПРОДУВОЧНОГО ВОЗДУХА ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Снижение температуры продувочного воздуха происходит в охладителе воздуха. Со временем его производительность падает из-за загрязнения элементов теплообмена. Это приводит к снижению мощности дизельного двигателя. Известная процедура очистки воздухоохладителя не обеспечивает полной очистки теплообменных элементов, особенно в труднодоступных местах, а ручная механическая очистка является трудоемкой и требует остановки двигателя на длительное время. Таким образом, повышение эффективности и снижение трудоемкости очистки охладителя воздуха является актуальной задачей.

С целью уменьшения указанных недостатков предлагается модернизировать систему очистки охладителя воздуха таким образом, чтобы распылительные устройства были установлены дополнительно с обеих сторон охлаждающего элемента, то есть в местах наибольшего загрязнения охладителя.

Повышение температуры продувочного воздуха приводит к уменьшению мощности двигателя, увеличению расхода топлива и накоплению отложений в выпускном коллекторе и газоходе, что может вызвать пожар.

Учитывая необходимость регулярных чисток охлаждающего элемента, серийная система является трудоемкой. Кроме очистки через распылители, она предусматривает систематическую разборку охладителя и ручную очистку элементов.

Предложенная модернизация позволяет повысить эффективность очистки охладителя продувочного воздуха дизельного двигателя за счет установки дополнительных распылителей мощней жидкости у боковых поверхностей охлаждающего элемента.

Модернизация не сложна и ее внедрение возможно на действующих судах силами машинной команды при долгосрочной остановке судна для технического обслуживания и проведения ремонта.

Решение является универсальным и может быть введено на судах с двигателями, имеющими газотурбинный наддув с охлаждением продувочного воздуха.

Применение модернизированной системы позволит также уменьшить трудоемкость очистки охлаждающих элементов воздухоохладителя за счет отказа от ручной механической очистки труднодоступных поверхностей охлаждения.

Ключевые слова: продувочный воздух, охладитель, охлаждающий элемент, распылитель.

Samarin O. E., Vryblevskiy R. Ye. IMPROVING THE CLEANING EFFICIENCY OF THE DIESEL ENGINE PURGE AIR COOLER

To increase the mass of the air charge, you need to increase its density. In turn, the density of air can be increased if you raise the air pressure and lower its temperature.

The temperature of the purge air decreases in the air cooler. Over time, its productivity decreases due to contamination of heat transfer elements. This reduces the power of the diesel engine. The known procedure for cleaning the air cooler does not provide complete cleaning of heat exchangers, especially in hard to reach places, and manual mechanical cleaning is time consuming and requires stopping the engine for a long time. Improving the efficiency and reducing the complexity of cleaning the air cooler is an urgent task.

In order to reduce these shortcomings, it is proposed to upgrade the air cooler cleaning system so that the spray devices were additionally installed on both sides of the cooling element, ie in places of greatest contamination of the cooler.

An increase in the temperature of the purge air leads to a decrease in engine power, increased fuel consumption and accumulation of deposits in the exhaust manifold and flue, which can cause a fire.

Given the need for regular cleaning of the cooling element, the serial system is time consuming. In addition to cleaning through sprays, it involves systematic disassembly of the cooler and manual cleaning of the elements.

The proposed modernization allows to increase the cleaning efficiency of the blower air cooler of the diesel engine by installing additional sprays of detergent near the side surfaces of the cooling element.

Modernization is not difficult and its implementation is possible on existing vessels by the engine crew with a long-term stop of the vessel for maintenance and repair.

The solution is universal and can be implemented on ships with gas-turbocharged engines with purge air cooling.

The use of an upgraded system will also reduce the complexity of cleaning the cooling elements of the air cooler by avoiding manual mechanical cleaning of hard-to-reach cooling surfaces.

Keywords: *purge air, cooler, cooling element, spray.*

© Самарін О. Є., Врублевський Р. Є.

Статтю прийнято
до редакції 28.05.20

ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ПРИСТРОЮ ДЛЯ КЕРУВАННЯ ЗМІНАМИ ШВИДКОСТІ ІЗ ЗУБЧАСТИМ ДИФЕРЕНЦІАЛОМ І ЗАМКНУТОЮ ГІДРОСИСТЕМОЮ ЧЕРЕЗ ВОДИЛО

Стрілець О. Р., к.т.н., доцент Національного університету водного господарства та природокористування (м. Київ), e-mail: o.r.strilets@nuwm.edu.ua, ORCID: 0000-0003-3834-7176;

Малашенко В. О., д.т.н., професор Національного університету «Львівська політехніка», e-mail: volod.malash@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7889-7303;

Стрілець В. М., к.т.н., професор Національного університету водного господарства та природокористування (м. Київ), e-mail: v.m.strilets@nuwm.edu.ua, ORCID: 0000-0003-2098-2315

Метою дослідження є побудова динамічної моделі пристрою зміни швидкості за допомогою зубчастого диференціала і замкнутої гідросистеми, де ведучою ланкою є сонячне зубчасте колесо, а замкнута гідросистема зв'язана з водилом і завдяки зміні його швидкості використовується для отримання необхідного закону руху на веденій ланці – епіциклі.

Із аналізу останніх публікацій виявлено, що новим пристроям керування змінами швидкості із зубчастим диференціалом і замкнутою гідросистемою через водило питанням динаміки приділено мало уваги. Вирішення цих питань дозволять розробити методи зменшення впливу динамічних навантажень на механічні приводи машин при зміні швидкості.

У статті отримана динамічна модель руху нових пристроїв зміни швидкості за допомогою зубчастого диференціала із замкнутою гідросистемою через водило у вигляді рівняння динаміки методом Лагранжа II роду. Результатом рішення рівняння динаміки в частинних похідних є система двох диференціальних рівнянь з невідомими похідними швидкостей сонячного зубчастого колеса та епіциклу.

Отримані результати є підґрунтям для подальшого комп'ютерного моделювання на ПК та проведення кількісного аналізу з метою оцінки роботи таких пристроїв для характерних випадків зміни обертального моменту опору: періодичного, ударного довготривалого, ударного короткотривалого і значного перенавантаження, аж до зупинки машини.

Ключові слова: динамічна модель, пристрій для керування змінами швидкості, зубчастий диференціал, замкнута гідросистема, сонячне зубчасте колесо, епіцикл, водило, сателіт.

DOI: 10.33815/2313-4763.2020.1.22.131-130

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. При виконанні технологічних операцій машинами у різних галузях промисловості необхідна зміна швидкості за величиною і напрямом. Для керування змінами швидкостей у сучасній техніці, наприклад, у транспортних, гірничих, будівельних, дорожніх, меліоративних і сільськогосподарських машинах, на судах, літальних і підводних апаратах, у верстатах, на підйомно-транспортному устаткуванні тощо використовуються пристрої у вигляді ступінчастих і безступінчастих коробок швидкостей. Основними недоліками ступінчастого керування швидкістю за величиною та напрямом є: складність конструкції пристроїв, висока матеріаломісткість, великі динамічні навантаження, які виникають під час переходу з однієї швидкості на другу навіть зі синхронізаторами. Для безступінчастого керування швидкістю основним недоліком є інтенсивне спрацювання деталей унаслідок тертя через використання фрикційних гальм і блокувальних фрикційних муфт. Через наявність багатьох недоліків цих пристроїв запропоновані нові пристрої у вигляді зубчастих диференціалів з замкнутими гідросистемами [1, 2]. Для згаданих пристроїв керування змінами швидкості проведені широкі кінематичні [3] й енергетичні [4] дослідження. Проектування та експлуатація таких пристроїв вимагає глибоких знань про силові, особливо динамічні процеси, які виникають у них. Дослідження динамічних процесів у пристроях зміни швидкості із зубчастими диференціалами, де керування швидкістю здійснюється за допомогою замкнутої гідросистеми через водило, є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. До механічних пристроїв із зубчастими диференціалами проявляють цікавість багато вітчизняних і зарубіжних учених, які охоплюють питання кінематики, динаміки, енергетичної ефективності та інші. Проаналізуємо деякі з них, наведені в наукових роботах [5–21].

У [5] проаналізовано вплив зміни форми профілю зуба планетарної передачі на динаміку без урахування енергозатрат.

У [6] запропонована і досліджена нелінійна динамічна модель двоступінчастого планетарного механізму на підставі аналітичного рішення динамічних рівнянь у програмі MATLAB, але для замкнутої конструкції механізму.

В [7] представлені результати перевірки динамічної моделі привода, з відмінним від даного дослідження редуктором, які проводилися на реальному об'єкті в різних умовах експлуатації і симуляційні дослідження, щоб визначити придатність моделі.

В [8] розроблена динамічна модель для аналізу коливань від обертального моменту в планетарному механізмі. Модель ураховує нелінійні фактори, такі як жорсткість сітки, що змінюється в часі, люфт передач і в'язке демпування та використовується для діагностування виникнення тріщин у водилі планетарного механізму.

В [9] автори використали комп'ютерне моделювання числовими методами для симуляції динамічної моделі стенда для дослідження зубчастого зачеплення, що може бути використана для аналізу впливу різних конструкційних, технологічних та операційних факторів на вібраційні явища в довільній парі зубчастих коліс.

У [10] на основі обертального моменту рівнянь силового балансу і силового аналізу основних елементів проаналізовано розподіл потужностей багатоступінчастого мікропланетарного редуктора 2К-Н.

У [11] автори пропонують алгоритм для вирішення завдання з виявлення виродженої планетарної зубчастої передачі, автоматизованої за допомогою інтерактивної комп'ютерної програми. Алгоритм застосовується для передач з будь-якою кількістю ступенів свободи.

В [12] звертається увага на повне розуміння базової механіки планетарних передач та оцінки їх механічної ефективності й підсумовується, що для тих самих вхідних та вихідних ланок втрата потужності має для кожної дійсної послідовності кутових швидкостей своєрідне математичне вираження.

В [13] наведені причини, які стримують застосування плавно регульованої планетарної передачі через наявність конструктивної складності механізму регулювання передаточного відношення та описані варіанти його спрощення.

В [14] звернута увага, що планетарні передачі використовуються в промисловості за багатьма перевагами, які мають підвищену ефективність і дуже компактний привод, складений із зубчастих коліс, і вихід з ладу однієї ланки впливає на всю передачу, тому необхідно знати причини цього.

В [15] пропонується диференціальне рівняння динаміки системи планетарних передач подвійним і тиском кутів. Для вирішення рівняння використовується метод Рунге-Кутти 4-го порядку.

В [16] описана будова, керування та чисельне моделювання нового бінарного керованого привода змінної жорсткості (BcVSA), для якого також складені рівняння динаміки планетарної передачі у його складі.

В [17] представлений аналітичний метод, який може забезпечити зниження динамічних вібрацій і шуму в автоматичній коробці передач, що містить крім іншого планетарну передачу, завдяки аналізу розробленої математичної моделі вібрацій змішаних передач від згину, кручення та осьових коливань.

В [18] отримані безрозмірні динамічні рівняння багатоступінчастої передаточної системи, яка містить двоступінчасту передачу з нерухомими осями та одноступінчасту планетарну передачу для встановлення причин зносу сателіта.

В [19] розглядається кусково-задана нелінійна динамічна модель обгінної муфти типу SOWC, а також люфт та зміна жорсткості зачеплення за часом планетарної передачі гібридного планетарного привода.

В [20] розроблений метод чисельного дослідження квазістатичних характеристик розподілу навантаження для сателітів планетарних передач, установлених на підшипниках ковзання, для оцінки динамічних показників їх роботи.

В [21] запропонована динамічна модель керування швидкістю через епіцикл привода із зубчастою диференціальною передачею і замкнутою гідросистемою.

Із аналізу останніх публікацій видно, що питанням динаміки нових пристроїв керування змінами швидкості із зубчастим диференціалом за допомогою замкнутої гідросистеми приділено недостатньо уваги. Ці питання динаміки таких пристроїв чекають свого вирішення. Вивчення динаміки таких пристроїв дозволить розробити методи зменшення впливу динамічних навантажень на них.

Формулювання мети статті, постановка задачі. Метою роботи є виконати дослідження динамічних процесів у пристроях зміни швидкості за допомогою зубчастого диференціала із замкнутою гідросистемою, де ведучою ланкою є сонячне зубчасте колесо і приводиться електричним двигуном, а замкнута гідросистема зв'язана з водилом і використовується для отримання необхідного закону руху на веденій ланці – епіциклі.

Для досягнення даної мети поставлені такі задачі:

- розробити математичну модель руху зубчастого диференціала з замкнутою гідросистемою і керуванням через водило;
- скласти рівняння динаміки, які описують передачу обертового моменту;
- знайти рішення складених рівнянь динаміки.

Об'єктом дослідження є пристрій зміни швидкості, що складається з зубчастого диференціала та замкнутої гідросистеми, де ведучою ланкою є сонячне зубчасте колесо, що приводиться електричним двигуном, а замкнута гідросистема зв'язана з водилом і використовується для отримання необхідного закону руху на веденій ланці – епіциклі.

Предметом дослідження є динамічні процеси, що виникають у пристрої зміни швидкості при передачі ним типових випадків навантаження у вигляді обертового моменту.

Виклад матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. На рис. 1 наведена гідравлічна схема замкнутої гідросистеми, яка складається з гідронасоса 1, трубопроводів 2, регулювального крана 3, зворотного клапана 4 і ємності з рідиною 5.

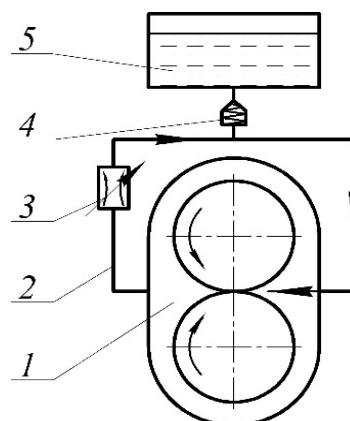


Рисунок 1 – Принципова схема замкнутої гідросистеми

Принцип роботи замкнутої гідросистеми у пристрої керування швидкістю описаний у попередніх дослідженнях, зокрема [2]. Так, при обертанні гідронасос перекачує рідину в замкнутій гідросистемі, що складається з трубопроводів, зворотного клапана, ємності для

рідини і регулювального крана, тоді, коли регулювальний кран відкритий. Якщо регулювальний кран закритий, тоді замкнута гідросистема закрита, тобто гідронасос зупинений і, водночас, водило, яке зв'язане з гідронасосом, буде зупинене. Цей принцип роботи замкнутої гідросистеми використаний для керування кутовою швидкістю веденої ланки зубчастого диференціала – епіциклу, через зміну швидкості водила завдяки пропускній здатності рідини, яка рухається в замкнутій гідросистемі через регулювальний кран. Тобто кутова швидкість водила змінюється від 0 до ω_{max} . Дозаповнення гідросистеми рідиною здійснюється із ємності через зворотний клапан.

На рис. 2 показаний зубчастий диференціал, який містить сонячне зубчасте колесо 1, сателіти 2, епіцикл 3 і водило 4, що розміщені в корпусі 5. Замкнута гідросистема 6 зв'язана з валом водилом 4 зубчастою передачею 7.

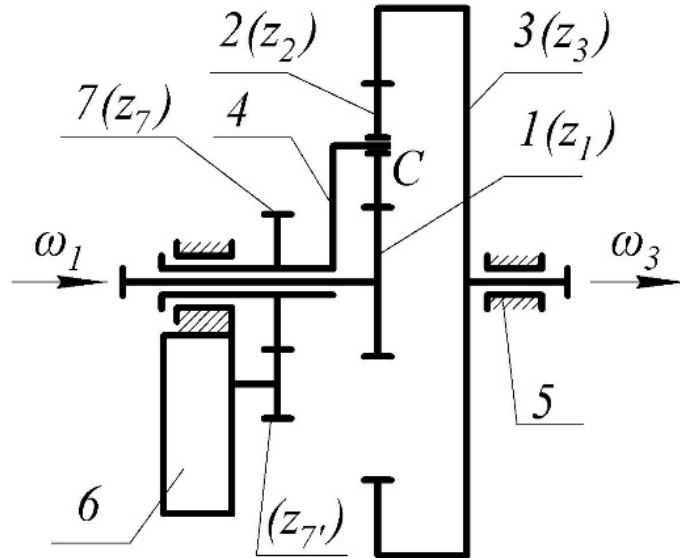


Рисунок 2 – Схема зубчастого диференціала з керуванням за допомогою водила

Яким чином відбувається керування швидкістю ω_3 веденої ланки – епіциклу за допомогою такого пристрою з диференціальною передачею у випадку, коли ведучою ланкою буде сонячне зубчасте колесо, а керування здійснюється за допомогою водила, детально описано в попередніх дослідженнях, наприклад, [3]. Загалом, якщо прийняти кутову швидкість ведучої ланки за $\omega_1 = const$, тоді завдяки зміні швидкості водила ($\omega_4 = var$) за допомогою зміни пропускної здатності замкнутої гідросистеми можна плавно змінювати швидкість веденої ланки – епіциклу (ω_3).

На рис. 3 показана блок-схема пристрою керування змінами швидкості через водило.

Змодельємо рух механічної системи (диференціал плюс привод водила) у формалізованому виді, застосувавши рівняння Лагранжа II роду загального вигляду:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\omega}} \right) = \Sigma M_i \quad (1)$$

На початку необхідно записати вирази для кінетичної енергії системи. У вираз для кінетичної енергії системи входять кінетичні енергії таких ланок: $T_1 = 0,5J_1\omega_1^2$ – сонячного колеса з валом; $T_2 = 0,5k(J_2\omega_2^2 + m_2v_C^2)$ – блока сателітів; $T_3 = 0,5J_3\omega_3^2$ – епіциклу з валом; $T_4 = 0,5(J_4 + J_7)\omega_4^2$ – водило із зубчастим колесом 7; $T_{7'} = 0,5J_{7'}\omega_{7'}^2$ – зубчасте колесо 7' із замкнутою гідросистемою.

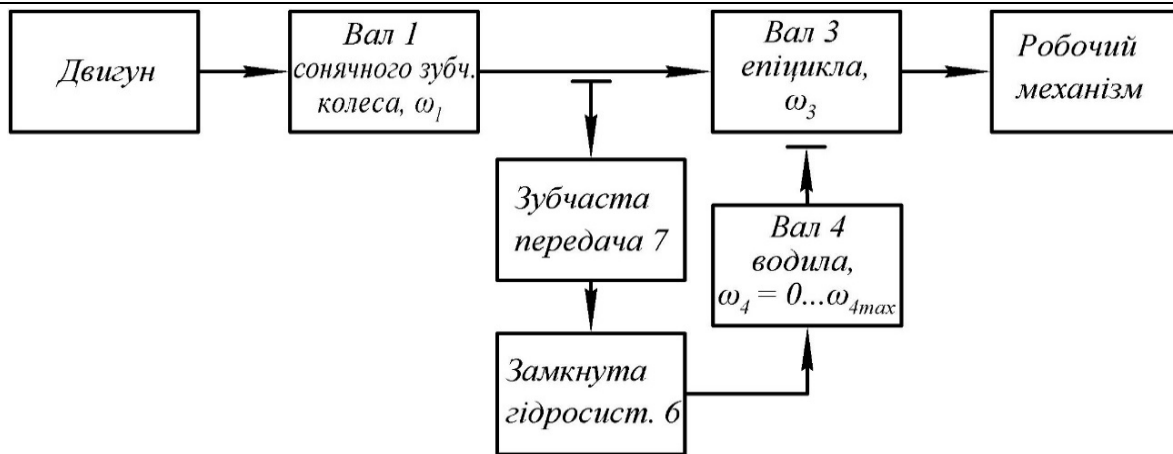


Рисунок 3 – Блок-схема передачі оберального моменту від сонячного зубчастого колеса до епіциклу

Тоді вираз для загальної кінетичної енергії такого пристрою має вид:

$$2T = J_1\omega_1^2 + k(J_2\omega_2^2 + m_2v_C^2) + J_3\omega_3^2 + (J_4 + J_7)\omega_4^2 + J_7\omega_7^2, \quad (2)$$

де ω_i , J_i і m_2 – відповідно кутові швидкості, динамічні моменти інерції ланок відносно центрів мас і маса сателіта; k – кількість сателітів; $v_C = \omega_4 r_4$ – колова швидкість осі обертання сателіта, r_4 – радіус обертання вогнища. Цей радіус дорівнює сумі початкових радіусів сонячного зубчастого колеса і сателіта $r_4 = 0,5(d_{w_1} + d_{w_2})$.

Зв'язок між швидкостями ланок у зубчастому диференціалі через задані швидкості ведучої ланки ω_1 і веденої ланки ω_3 наступний:

$$\omega_2 = \frac{\omega_1(u_{21}^{(4)}u_{34}^{(1)} - u_{31}^{(4)}u_{24}^{(1)}) + \omega_3u_{24}^{(1)}}{u_{34}^{(1)}}; \quad \omega_4 = \frac{\omega_3 - \omega_1u_{31}^{(4)}}{u_{34}^{(1)}}; \quad \omega_7 = \frac{\omega_3 - \omega_1u_{31}^{(4)}}{u_{34}^{(1)}u_{77}^{(1)}}, \quad (3)$$

де передаточні відношення для схеми зубчастого диференціала, що розглядається:

$$u_{21}^{(4)} = -\frac{z_1}{z_2}; \quad u_{31}^{(4)} = -\frac{z_1}{z_3}; \quad u_{24}^{(1)} = 1 - u_{21}^{(4)} = 1 + \frac{z_1}{z_2}; \quad u_{34}^{(1)} = 1 - u_{31}^{(4)} = 1 + \frac{z_1}{z_3}; \quad u_{77}^{(1)} = -\frac{z_7'}{z_7}; \quad (4)$$

Підставимо значення ω_2 , ω_4 , ω_7 і V_C у (2), отримаємо:

$$2T = J_1\omega_1^2 + k[J_2(\frac{\omega_1(u_{21}^{(4)}u_{34}^{(1)} - u_{31}^{(4)}u_{24}^{(1)}) + \omega_3u_{24}^{(1)}}{u_{34}^{(1)}})^2 + m_2(\frac{\omega_3 - \omega_1u_{31}^{(4)}}{u_{34}^{(1)}})^2 r_C^2] + J_3\omega_3^2 + (J_4 + J_7)(\frac{\omega_3 - \omega_1u_{31}^{(4)}}{u_{34}^{(1)}})^2 + J_7(\frac{\omega_3 - \omega_1u_{31}^{(4)}}{u_{34}^{(1)}u_{77}^{(1)}})^2. \quad (5)$$

У виразі (5) розкриємо дужки і зведемо члени з однаковими швидкостями:

$$\begin{aligned}
 2T = & [J_1 + \frac{kJ_2}{(u_{34}^{(1)})^2} (u_{21}^{(4)} u_{34}^{(1)} - u_{31}^{(4)} u_{24}^{(1)})^2 + \frac{km_2 r_C^2 + J_4 + J_7 + J_{7'}}{(u_{34}^{(1)})^2} (u_{31}^{(4)})^2] \omega_1^2 - \\
 & - \left\{ \frac{2kJ_2}{(u_{34}^{(1)})^2} [(u_{21}^{(4)} u_{34}^{(1)} - u_{31}^{(4)} u_{24}^{(1)}) u_{24}^{(1)}] + \frac{km_2 r_C^2 + J_4 + J_7 + J_{7'}}{(u_{34}^{(1)})^2} u_{31}^{(4)} \right\} \omega_3 \omega_1 + \\
 & + \left[\frac{kJ_2}{(u_{34}^{(1)})^2} (u_{24}^{(1)})^2 + \frac{km_2 r_C^2 + J_4 + J_7 + J_{7'}}{(u_{34}^{(1)})^2} + J_3 \right] \omega_3^2.
 \end{aligned} \tag{6}$$

Після введення позначень рівняння (6) запишемо у спрощеному вигляді:

$$2T = J_{11} \omega_1^2 - 2J_{13} \omega_3 \omega_1 + J_{33} \omega_3^2. \tag{7}$$

У виразі (7) маємо такі позначення:

$$\begin{aligned}
 J_{11} &= J_1 + \frac{kJ_2}{(u_{34}^{(1)})^2} (u_{21}^{(4)} u_{34}^{(1)} - u_{31}^{(4)} u_{24}^{(1)})^2 + \frac{km_2 r_C^2 + J_4 + J_7 + J_{7'}}{(u_{34}^{(1)})^2} (u_{31}^{(4)})^2; \\
 J_{13} &= \frac{2kJ_2}{(u_{34}^{(1)})^2} (u_{21}^{(4)} u_{34}^{(1)} - u_{31}^{(4)} u_{24}^{(1)}) u_{24}^{(1)} + \frac{km_2 r_C^2 + J_4 + J_7 + J_{7'}}{(u_{34}^{(1)})^2} u_{31}^{(4)}; \\
 J_{33} &= \frac{kJ_2}{(u_{34}^{(1)})^2} (u_{24}^{(1)})^2 + \frac{km_2 r_C^2 + J_4 + J_7 + J_{7'}}{(u_{34}^{(1)})^2} + J_3.
 \end{aligned}$$

Підставляючи вираз для кінетичної енергії (7) у рівняння Лагранжа II роду (1) і, беручи часткові похідні за кутовими швидкостями ω_1 і ω_3 , отримаємо систему двох диференціальних рівнянь

$$\begin{cases} J_{11} \dot{\omega}_1 + J_{13} \dot{\omega}_3 = M_{361}; \\ J_{13} \dot{\omega}_1 + J_{33} \dot{\omega}_3 = M_{363}, \end{cases} \tag{8}$$

де $M_{361} = M_1 + M_7 u_{71}^{(4)}$, $M_{363} = -M_3 + M_3 u_{77}^{(1)}$.

Зведений момент M_{361} визначаємо з рівності потужностей моментів сил при нерухомому водилі, а момент M_{363} – при нерухомому сонячному зубчастому колесі. Оскільки момент $M_1 = M_1(\omega_1)$ є функцією від кутової швидкості сонячного зубчастого колеса, момент зміни навантаження на валу епіциклу $M_3 = M_3(t)$ залежить від часу, а $M_{7'} = M_{7'}(v_{pi0})$ залежить від витрат рідини гідросистеми, то у загальному випадку отримана система (8) є нелінійною.

Для рішення приведемо систему (8) до спрощеного вигляду:

$$a_1 \dot{\omega}_1 + a_2 \dot{\omega}_3 = c_1; \tag{9}$$

$$b_1 \dot{\omega}_1 + b_2 \dot{\omega}_3 = c, \tag{10}$$

де $a_1 = J_{11}$; $a_2 = b_1 = J_{13}$; $b_2 = J_{33}$; $c_1 = M_{361}$; $c_3 = M_{363}$.

Перемножимо рівняння (9) на a_2/a_1 , маємо

$$a_2 \dot{\omega}_1 + \frac{b_1 a_2}{a_1} \dot{\omega}_3 = \frac{c_1 a_2}{a_1}. \tag{11}$$

Віднімемо від рівняння (10) рівняння (11), отримаємо такий вираз:

$$b_2 \dot{\omega}_3 - \frac{b_1 a_2}{a_1} \dot{\omega}_3 = c_3 - \frac{c_1 a_2}{a_1} \quad (12)$$

У виразі (12) зведемо подібні і визначимо $\dot{\omega}_3$.

$$\dot{\omega}_3 = \frac{c_3 - \frac{c_1 a_2}{a_1}}{b_2 - \frac{b_1 a_2}{a_1}} = \frac{c_3 a_1 - c_1 a_2}{b_2 a_1 - b_1 a_2} \quad (13)$$

Подібно визначимо $\dot{\omega}_1$. Перемножимо рівняння (10) на b_2/b_1 і дістанемо:

$$\frac{a_1 b_2}{b_1} \dot{\omega}_1 + b_2 \dot{\omega}_3 = \frac{c_1 b_2}{b_1} \quad (14)$$

Далі від рівняння (9) віднімемо рівняння (14) і отримаємо такий вираз:

$$a_2 \dot{\omega}_1 - \frac{a_1 b_2}{b_1} \dot{\omega}_1 = c_3 - \frac{c_1 b_2}{b_1} \quad (15)$$

Зведемо подібні й визначимо $\dot{\omega}_1$.

$$\dot{\omega}_1 = \frac{c_3 - \frac{c_1 b_2}{b_1}}{a_2 - \frac{a_1 b_2}{b_1}} = \frac{c_3 b_1 - c_1 b_2}{b_1 a_2 - b_2 a_1} \quad (16)$$

Тоді за (13) і (16) маємо таку систему рівнянь:

$$\dot{\omega}_1 = \frac{d\omega_1}{dt} = \frac{c_3 b_1 - c_1 b_2}{b_1 a_2 - b_2 a_1}; \quad \dot{\omega}_3 = \frac{d\omega_3}{dt} = \frac{c_3 a_1 - c_1 a_2}{b_2 a_1 - b_1 a_2} \quad (17)$$

Проінтегруємо вирази (17), маємо:

$$\omega_1 = \left(\frac{c_3 b_1 - c_1 b_2}{b_1 a_2 - b_2 a_1} \right) t + \alpha_1; \quad \omega_3 = \left(\frac{c_3 a_1 - c_1 a_2}{b_2 a_1 - b_1 a_2} \right) t + \alpha_2 \quad (18)$$

де α_1 і α_2 – постійні інтегрування, визначаються із початкових умов.

Переходом до початкових позначень отримаємо вирази шуканих параметрів:

$$\omega_1 = \left(\frac{M_{363} J_{13} - M_{361} J_{33}}{J_{13}^2 - J_{33} J_{11}} \right) t + \alpha_1; \quad (19)$$

$$\omega_3 = \left(\frac{M_{363} J_{11} - M_{361} J_{13}}{J_{33} J_{11} - J_{13}^2} \right) t + \alpha_2$$

Отримані аналітичні вирази є розв'язками поставленої задачі.

Висновки і перспектива подальшої роботи в даному напрямі.

1. У роботі розроблено математичну модель руху зубчастого диференціала з можливістю керування рухом епіциклу замкнутою гідросистемою через водило з метою забезпечення необхідного закону зміни навантаження на ведучій ланці – сонячному зубчастому колесі, що відповідає заданому технологічному процесу.

2. Складені рівняння динаміки, які описують передачу обертового моменту, і знайдені їх рішення.

3. Користуючись виразом (3) відносно ω_7 і вихідними силовими даними механічного привода, можна проводити вибір необхідної гідросистеми для керування швидкістю руху веденої його ланки.

4. Отримані результати можуть бути підґрунтям для проведення кількісного аналізу кінематичних та силових залежностей механічного привода із зубчастим диференціалом і гідросистемним керуванням через водило.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Малащенко В.О., Стрілець О.Р., Стрілець В.М. Класифікація способів і пристроїв керування процесом зміни швидкості у техніці. *Підйомно-транспортна техніка*. 2015. №1. С. 70–78.

2. Malashchenko, V., Strilets O., Strilets V. Fundamentals of Creation of New Devices for Speed Change Management. *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*. 2015. Vol. 1. No. 2. pp. 11–20.

3. Стрілець О. Р. Керування змінами швидкості за допомогою диференціальної передачі через епіцикл. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*. Тернопіль: ТНТУ. 2015. № 4(80). С. 129–135.

4. Стрілець О.Р. Керування процесом зміни швидкості за допомогою диференціальної передачі через водило. *Вісник Кременчуцького національного університету*. Кременчук : КрНУ. 2015. Вип. 6(95). С. 72–77.

5. Bahk, C.-J, Parker, R.G., (2013) Analytical investigation of tooth profile modification effects on planetary gear dynamics. *Mechanism and Machine Theory*, Elsevier, 70, 298–319. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2013.07.018>.

6. Huang, Q., Wang, Y., Huo, Zh., Xie, Yu., (2013) Nonlinear Dynamic Analysis and Optimization of Closed-Form Planetary Gear System. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013.12. <http://doi.org/10.1155/2013/149046>.

7. Peruń, G., (2014) Verification Of Gear Dynamic Model In Different Operating Conditions, *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 84, 99-104. http://sjsutst.polsl.pl/archives/2014/vol84/099_ZN84_2014_Perun.pdf.

8. Fan Lei. Wang Shaoping. Wang Xingjian, Han Feng, Lyu Huawei, (2016) Nonlinear Dynamic Modeling of a Helicopter Planetary Gear Train for Carrier Plate Crack Fault Diagnosis. *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 29, Iss. 3, 675–687. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2016.04.008>.

9. Peruń, G., Kozuba, J., (2017) Numerical Research of Toothed Gears Geometry Influence On Power Transmission System Vibroactivity. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, Vol. 24, No. 4, 239–246. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0010.3135>.

10. Li Jianying, Hu Qingchun, Zong Changfu, Zhu Tianjun (2017) Power Analysis and Efficiency Calculation of Multistage Micro-planetary Transmission. *Energy Procedia*, 141, 654-659. <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.088>.

11. Wenjian Yang, Huafeng Ding (2018) Automatic detection of degenerate planetary gear trains with different degree of freedoms. *Applied Mathematical Modelling*, 64, 320–332. <http://doi.org/10.1016/j.apm.2018.07.038>.

12. Esmail, E.L., Pennestri, E., Hussein Juber A. (2018) Power losses in two-degrees-of-freedom planetary gear trains: A critical analysis of Radzimovsky's formulas, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 128, 191–204, <http://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2018.05.015>.

13. Dankov, A.M. (2018) Planetary Continuously Adjustable Gear Train With Force Closure Of Planet Gear And Central Gear: From Idea To Design. *Science & Technique*, 17(3), 228–237. <http://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-3-228-237>.

14. Dobariya Mahesh, Bhavin Gajjar (2018) Design of Compound Planetary Gear Train, *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, vol. 6, iss. 4, 3179-3184, <http://doi.org/10.22214/ijraset.2018.4527>.
15. Heyun B., Guanghu J., Fengxia L., Rupeng Zh., Xiaozhu Z., (2018) Dynamic analysis of planetary gear train system with double moduli and pressure angles. *MATEC Web Conf.*, 211. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201821117003>.
16. Hussain, I., Albalasie, A., Awad, M.I., Seneviratne, L., Gan, D., (2018) Modeling, Control, and Numerical Simulations of a Novel Binary-Controlled Variable Stiffness Actuator (BcVSA). *Front. Robot. AI* 5:68. <https://doi.org/10.3389/frobt.2018.00068>.
17. Su, C., Wang, S., Liu, Y., Dong, P., & Xu, X. (2019). Coupled vibrations of a drive system during automatic transmission. *Advances in Mechanical Engineering*. <https://doi.org/10.1177/1687814019833508>.
18. Wang, X., (2019) Nonlinear dynamics of planetary gear wear in multistage gear transmission system. *Journal of Vibroengineering*, Vol. 21, Iss. 6, 1738–1750. <https://doi.org/10.21595/jve.2019.20471>.
19. Zhizhou Jia, Pingkang Li, (2020) Nonlinear Dynamics of a Power-Split Transmission Unit with a Planetary Gear Train and Selectable One-Way Clutches. *Hindawi Complexity*, Vol. 2020, Art. ID 8729365, 16. <https://doi.org/10.1155/2020/8729365>.
20. Guo, Z.; Li, S.; Wu, W.; Zhang, L. (2020) Quasi-Static Load Sharing Characteristics of a Planetary Gear Set with Planet Journal Bearings. *Applied Sciences*, 10, 1113. <https://doi.org/10.3390/app10031113>.
21. Стрілець О. Р. Малащенко В. О., Пасіка В. Р., Стрілець В. М. Динамічна модель керування швидкості через епіцикл привода із зубчастою диференціальною передачею / *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Динаміка, міцність та проектування машин і приладів*. Львів: НУЛП, 2019. № 911. С. 63–67.

REFERENCES

1. Malashchenko, V., Strilets O., Strilets V. (2015) Kласифікація способів і пристроїв керування процесом зміни швидкості у техніці. *Підприємство-транспортна техніка*. No. 1. 70–78.
2. Malashchenko, V., Strilets O., Strilets V. (2015) Fundamentals of Creation of New Devices for Speed Change Management. *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*. Vol. 1. No. 2. 11–20.
3. Strilets O. (2015) Керування змінною швидкості за допомогою диференціальної передачі через епіцикл. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*. 4(80). 129–135.
4. Strilets O. (2015) Керування процесом зміни швидкості за допомогою диференціальної передачі через водило. *Вісник Кременчуцького національного університету*. Кременчук : KrNU. 6(95). 72–77.
5. Bahk, C.-J, Parker, R.G., (2013) Analytical investigation of tooth profile modification effects on planetary gear dynamics. *Mechanism and Machine Theory*, Elsevier, 70, 298–319. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2013.07.018>.
6. Huang, Q., Wang, Y., Huo, Zh., Xie, Yu., (2013) Nonlinear Dynamic Analysis and Optimization of Closed-Form Planetary Gear System. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013.12. <http://doi.org/10.1155/2013/149046>.
7. Peruń, G., (2014) Verification Of Gear Dynamic Model In Different Operating Conditions, *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 84, 99-104. http://sjsutst.polsl.pl/archives/2014/vol84/099_ZN84_2014_Perun.pdf.
8. Fan Lei, Wang Shaoping, Wang Xingjian, Han Feng, Lyu Huawei, (2016) Nonlinear Dynamic Modeling of a Helicopter Planetary Gear Train for Carrier Plate Crack Fault Diagnosis.

Chinese Journal of Aeronautics, Vol. 29, Iss. 3, 675-687.
<https://doi.org/10.1016/j.cja.2016.04.008>.

9. Peruñ, G., Kozuba, J., (2017) Numerical Research of Toothed Gears Geometry Influence On Power Transmission System Vibroactivity. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, Vol. 24, No. 4, 239–246. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0010.3135>.

10. Li Jianying, Hu Qingchun, Zong Changfu, Zhu Tianjun (2017) Power Analysis and Efficiency Calculation of Multistage Micro-planetary Transmission. *Energy Procedia*, 141, 654-659. <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.088>.

11. Wenjian Yang, Huafeng Ding (2018) Automatic detection of degenerate planetary gear trains with different degree of freedoms. *Applied Mathematical Modelling*, 64, 320-332. <http://doi.org/10.1016/j.apm.2018.07.038>.

12. Esmail, E.L., Pennestri, E., Hussein Juber A. (2018) Power losses in two-degrees-of-freedom planetary gear trains: A critical analysis of Radzimovsky's formulas, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 128, 191–204, <http://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2018.05.015>.

13. Dankov, A.M. (2018) Planetary Continuously Adjustable Gear Train With Force Closure Of Planet Gear And Central Gear: From Idea To Design. *Science & Technique*, 17(3), 228–237. <http://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-3-228-237>.

14. Dobariya Mahesh, Bhavin Gajjar (2018) Design of Compound Planetary Gear Train, *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, vol. 6, iss. 4, 3179-3184, <http://doi.org/10.22214/ijraset.2018.4527>.

15. Heyun B., Guanghu J., Fengxia L., Rupeng Zh., Xiaozhu Z., (2018) Dynamic analysis of planetary gear train system with double moduli and pressure angles. *MATEC Web Conf.*, 211. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201821117003>.

16. Hussain, I., Albalasie, A., Awad, M.I., Seneviratne, L., Gan, D., (2018) Modeling, Control, and Numerical Simulations of a Novel Binary-Controlled Variable Stiffness Actuator (BcVSA). *Front. Robot. AI* 5:68. <https://doi.org/10.3389/frobt.2018.00068>.

17. Su, C., Wang, S., Liu, Y., Dong, P., & Xu, X. (2019). Coupled vibrations of a drive system during automatic transmission. *Advances in Mechanical Engineering*. <https://doi.org/10.1177/1687814019833508>.

18. Wang, X., (2019) Nonlinear dynamics of planetary gear wear in multistage gear transmission system. *Journal of Vibroengineering*, Vol. 21, Iss. 6, 1738-1750. <https://doi.org/10.21595/jve.2019.20471>.

19. Zhizhou Jia, Pingkang Li, (2020) Nonlinear Dynamics of a Power-Split Transmission Unit with a Planetary Gear Train and Selectable One-Way Clutches. *Hindawi Complexity*, Vol. 2020, Art. ID 8729365, 16. <https://doi.org/10.1155/2020/8729365>.

20. Guo, Z.; Li, S.; Wu, W.; Zhang, L. (2020) Quasi-Static Load Sharing Characteristics of a Planetary Gear Set with Planet Journal Bearings. *Applied Sciences*, 10, 1113. <https://doi.org/10.3390/app10031113>.

21. Strilets O., Malashchenko V., Pasika V., Strilets V. (2019) Dynamichna model keruvannya shvydkosti cherez epitsykl pryvoda iz zubchastoyu dyferentsialnoyu peredacheyu. *Visnyk Natsionalnoho universytetu „Lvivska politehnika». „Dynamika, mitsnist ta proektuvannya mashyn i pryladiv». № 911. Lviv, NU «LP». 63–67.*

Стрилец О. Р., Малащенко В. А., Стрилец В. Н. ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УСТРОЙСТВА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЯМИ СКОРОСТИ С ЗУБЧАТЫМ ДИФФЕРЕНЦИАЛОМ И ЗАМКНУТОЙ ГИДРОСИСТЕМОЙ ПОСРЕДСТВОМ ВОДИЛА

Целью исследования является построение динамической модели устройства изменения скорости с помощью зубчатого дифференциала и замкнутой гидросистемы, где ведущим звеном является солнечное зубчатое колесо, а замкнутая гидросистема связана с водилом и используется для получения необходимого закона движения на ведомом звене – эпицикле.

Из анализа последних публикаций установлено, что вопросам динамики новых устройств управления изменениями скорости с зубчатым дифференциалом и замкнутой гидросистемой уделено мало внимания и они ждут своего решения. Изучение динамики таких устройств позволит разработать методы уменьшения влияния динамических нагрузок на них.

В статье получена динамическая модель движения механического устройства изменения скорости с помощью зубчатого дифференциала и замкнутой гидросистемы. Используя метод Лагранжа составлены и решены уравнения динамики.

Полученные результаты являются основой для дальнейшего компьютерного моделирования и количественного анализа работы таких устройств для характерных случаев изменения крутящего момента сопротивления: периодического, ударного длительного, ударного кратковременного и значительной перегрузки, до полной остановки машины.

Ключевые слова: динамическая модель, устройство для управления изменениями скорости, зубчатая дифференциальная передача, замкнутая гидросистема, эпицикл, солнечное зубчатое колесо, водило, сателлит.

Strilets O., Malashchenko V., Strilets V. DYNAMIC MODEL OF SPEED CHANGE CONTROL DEVICE WITH DIFFERENTIAL GEAR AND CLOSED-LOOP HYDROSYSTEM VIA CARRIER

The purpose of the study is to build a dynamic model of the speed change device including a differential gear and a closed-loop hydraulic system, where the driving link is a sun gear driven by an electric motor, while a closed-loop hydraulic system is connected to the carrier and can change its speed due to changes in system's throughput, the ability of the fluid to move across the hydraulic system, so that the necessary law of motion on the driven link - the ring gear can be obtained.

The analysis of recent publications has revealed that the research of new speed control devices with a differential gear and a closed-loop hydraulic system through the carrier pays much attention to their structure, principle of operation, and the change in speed, that has been confirmed by analytical and graphical dependences. In addition, energy efficiency and self-braking of such devices has been studied by determining the coefficient of performance efficiency. The dynamics of such devices is waiting to be resolved. It will allow us to develop methods to reduce the impact of dynamic loads on the mechanical drives of machines when changing speed.

The article proposes a mathematical model of the movement of a mechanical system for new devices for changing the speed using a differential gear with a closed-loop hydraulic system through the carrier. For this purpose, the equation of dynamics by the Lagrange method of the second kind has been used and the equation of kinetic energy of the system has been formed. Since there is a relationship between the speeds of all links in the differential gear, the expression for the kinetic energy of the system has been described by the speed of the driving and driven links, i.e., by the speed of the sun gear and the ring gear. The result of solving the Lagrange equation in partial derivatives is a system of two differential equations with unknown derivatives of the velocities of the sun gear and the ring gear.

The obtained results are the basis for further computer simulation and quantitative analysis to assess the performance of such devices and select the necessary closed-loop hydraulic system to control speed changes. Based on the dynamic model, it is possible to compose and solve the equations of dynamics for typical cases of changes in the torque resistance: long-term shock, short-term shock and significant overload, up to the stop of the machine.

Keywords: dynamic model, speed changes control device, gear differential, closed-loop hydraulic system, ring gear, sun gear, carrier, planet.

© Стрілець О. Р., Малащенко В. О., Стрілець В. М.

Статтю прийнято
до редакції 29.04.20

УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВУЗЛІВ З'ЄДНАННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННОГО ПОНТОНА З ПОПЕРЕЧНОЮ ДІАФРАГМОЮ ТА МЕТАЛЕВОЮ БАШТОЮ ПЛАВУЧОГО КОМПЗИТНОГО ДОКУ

Щедролоєв О. В., *д.т.н., професор, завідувач кафедри суднобудування та ремонту суден Херсонської філії Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, e-mail: aleksandr.schedrolosev@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0001-7972-3882;*

Узлов О. М., *старший викладач кафедри суднобудування та ремонту суден Херсонської філії Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, e-mail: uzlov1944@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3790-5669;*

Кириченко К. В., *викладач кафедри суднобудування та ремонту суден Херсонської філії Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, e-mail: kostiantynkyrychenko@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0002-0974-6904*

Виконано аналіз відомих технічних рішень у докобудуванні, які направлені на раціоналізацію виробничих ресурсів при побудові конструкції композитних доків. Установлено, що у наявних рішеннях не зазначені рекомендації зменшення металоємності залізобетонного понтону композитних плавучих доків. У результаті проведеного дослідження удосконалено конструкції плавучих композитних доків завдяки зменшенню кількості набору у залізобетонному понтоні. Обґрунтовано раціональність побудови конструкції понтона без установаження шпангоутів, флорів та б'ємсів під баштами й описано технологічні рекомендації встановлення поперечних перегородок між внутрішніми бортами через 4 шпанці, тобто через 3 метри на відміну від класичної конструкції, в якій відстань між перегородками 1,5 метри. Проведено аналіз особливостей конструювання вузлів з'єднання залізобетонного понтона з поперечною діафрагмою та металевою баштою плавучого композитного доку, описано складнощі, які виникають. Розроблено конструкцію та технологічні рекомендації побудови вузлів з'єднання залізобетонного понтона з поперечною діафрагмою та металевою баштою. Описано послідовність конструювання конструкції плавучого доку та технологічні операції для забезпечення міцності, водонепроникності і морозостійкості бетону при міжсекційних з'єднаннях. Розроблені рішення для збільшення місцевого зчеплення бетону із хрестоподібними деталями і запобігання його відшаровуванню. Наведено традиційну схему конструкції композитного доку та конструктивного вузла з'єднання металевої башти із залізобетонним понтоном. Удосконалено схему композитного доку, схеми конструкції вузлів з'єднання залізобетонного понтона з поперечною діафрагмою та металевою баштою, які призначені для побудови плавучих композитних доків зі зменшеною металоємністю у понтоні.

Ключові слова: *композитний плавучий док, залізобетонний понтон, металева башта, поперечна діафрагма, конструювання доків.*

DOI: 10.33815/2313-4763.2020.1.22.131-141

Вступ. З урахуванням тенденцій збільшення частки судноремонтних робіт та необхідності обслуговування підводної частини суден, зберігається підвищений попит на плавучі доки. Побудова плавучих композитних доків є більш доцільною з економічних міркувань. У композитних плавучих доках із залізобетону виготовляють понтон, а повністю металевими роблять бокові башти [1]. Ставлячи задачу раціоналізувати наявні конструкції плавучих доків, необхідно зменшити металоємність понтона, для цього необхідно удосконалити конструктивно-технологічні вузли з'єднання частин понтона.

Аналіз стану досліджуваної проблеми. Композитний плавучий док є складною технологічною інженерною спорудою, експлуатаційні умови роботи якої є екстремальними [2, 3]. Конструювання та технологія побудови плавучих доків потребують рішення низки технічних завдань, що не мають аналогів у світовій практиці [4, 5]. На плавучий док, як і на судно, поширюються вимоги класифікаційних товариств з контролю за його станом. Проектування конструкцій доку потребує системного підходу [6]. У дослідженні [7]

описані способи виготовлення простих коробчастих плавучих конструкцій понтонного типу, аналогічні доковим конструкціям, що розглядаються у статті. Авторами дослідження [8–10] наведені результати удосконалення конструкцій плавучих понтонів, описані особливості їх проектування та будівництва. Проведений аналіз останніх публікацій показав відсутність досліджень зменшення металоємності залізобетонного понтона композитних плавучих доків. Незважаючи на економічну доцільність застосування композитної конструкції плавучого доку [11, 12], в композитному доку з'явилися закладні деталі для приварювання башт довжиною, що дорівнює довжині доку, в результаті поздовжнього вигину при піднятті суден або при морських перегонах уздовж цих деталей з'явилися тріщини від вигину корпусу на хвилях. Розробка якісних конструктивних вузлів з'єднання поперечної діафрагми та металевої башти із залізобетонним понтоном й ефективної технології їх побудови й виготовлення є актуальним завданням.

Мета дослідження – для зниження собівартості конструкцій композитних плавучих доків необхідно зменшити металоємність конструкції залізобетонного понтона й тому необхідно удосконалити конструктивно-технологічні вузли з'єднання понтона з металевою баштою та поперечною діафрагмою.

Рішення задачі. Для відпрацювання конструкції вузла з'єднання металевої башти великої довжини із залізобетонним понтоном, крім варіантних розрахунків, було застосовано напівнатурне моделювання, у результаті якого в конструкцію вузла були введені металеві бімси з відповідним посиленням конструкції закладними деталями для їх кріплення, удосконалена система анкерування заставних деталей і додані деталі для підвищення зчеплення бетону корпусу понтона із закладними деталями. З'єднання башти з понтоном проводиться за допомогою хрестоподібних закладних деталей. Суцільні вертикальні смуги хрестоподібних закладних деталей з'єднані звареним швом з обшиванням башт, арматурою борту і поздовжнім перебиранням понтона. На рис. 1 наведено поперечний перетин композитного плавучого доку «класичної конструкції».

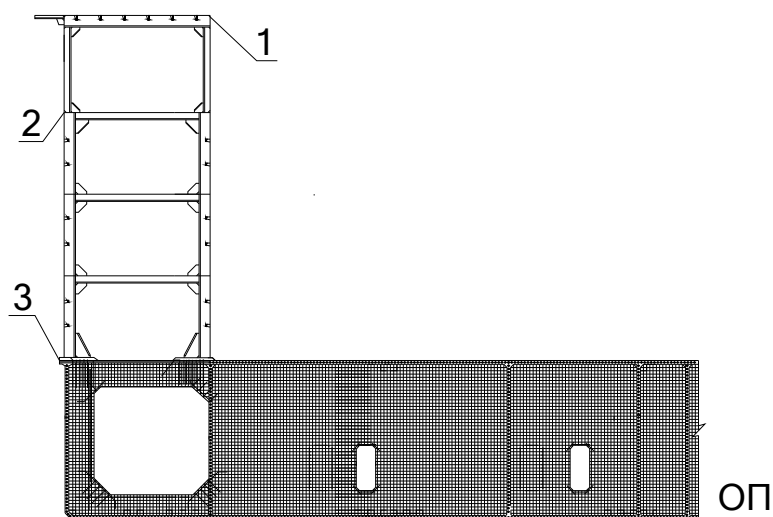


Рисунок 1 – Поперечний перетин композитного плавучого доку «класичної конструкції»:

1 – топ-палуба, 2 – палуба безпеки, 3 – стапель-палуба

На рис. 2 наведено поперечний перетин композитного плавучого доку зі зменшеною кількістю набору у понтоні. Башта приварюється до вкладного елемента та з'єднується з понтоном.

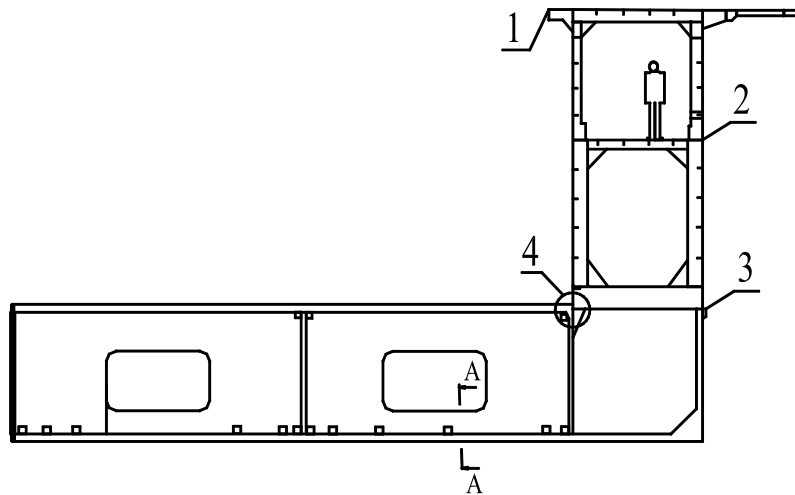


Рисунок 2 – Поперечний перетин композитного плавучого доку зі зменшеною кількістю набору у понтоні:

1 – топ-палуба, 2 – палуба безпеки, 3 – стапель-палуба, 4 – конструкція з'єднання днища понтона з поперечною діафрагмою

Горизонтальні смуги хрестоподібної деталі з'єднані звареним швом: зовнішня – з арматурним каркасом стапель-палуби, внутрішня – з бімсом і поперечним набором поздовжнього перебирання понтона [13]. Шпангоут борту, бімс і закладні деталі об'єднані у вертикальній площині в загальний рамний контур з поперечним набором башти (рис. 3).

Для збільшення місцевого зчеплення бетону із хрестоподібними деталями і запобігання його відшаруванню від них у результаті знакозмінного вигину корпусу доку на смугах хрестоподібних деталей установлені ребра (металеві смуги) у рівень із бетонною поверхнею борту, поздовжнім перебиранням і стапель-палубою понтона. Встановлення і приварювання металевих бімсів проводять під час монтажу блок-секцій башт, що дає змогу унеможливити появу зварювальних деформацій від приварювання бімсів. Отже, конструкція з'єднання металевої башти із залізобетонним понтоном композитного доку дає змогу виконувати цей вузол у складі залізобетонних секцій понтона на стендах, проводити бетонування секцій у зручному положенні з використанням відпрацьованої технології укладання бетону, водночас знижуючи трудомісткість і спрощуючи технологію робіт у стапельний період побудови доку.

При побудові понтона – очищення арматури від жирних плям і слідів фарби проводиться за допомогою хімічних розчинників, потім ці місця витираються насухо. Згинання арматурної сталі виконується на згинальних верстатах або вручну. Виготовлення арматурних сіток проводиться на автоматичній зварювальній машині або зварюванням перетин у шаховому порядку в середовищі CO_2 . Перед установленням на стенди арматурних сіток для збірки в об'єм стенди повинні бути очищені від бетону й бруду. Стенди для формування залізобетонних секцій повинні забезпечувати виготовлення секцій з гладкими поверхнями рівномірної товщини й забезпечувати швидке знімання відформованих секцій. Монтаж секцій башт на понтон допускається тільки після бетонування і досягнення міцності стиків заставних вузлів з'єднання башт з понтоном, а також усіх стиків зовнішнього і внутрішнього бортів не менше 21 МПа (210 кг/см^2) на відстані не менше 6 шпаций у ніс і корму від кінців установлюваних секцій.

Формування башт виконується від міделя у ніс і корму. Послідовність формування башт є наступною:

- навантаження секцій,
- прикреслення і прирізка по стиках і пазах,
- криплення на гребінках по пазах і прихватках на стиках секцій.

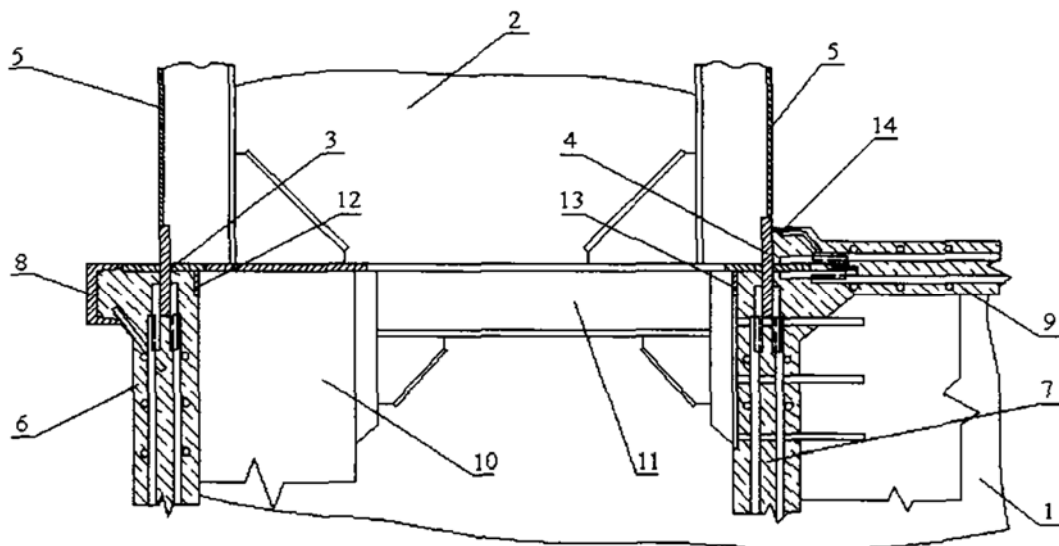


Рисунок 3 – Конструктивний вузол з'єднання металевої башти із залізобетонним понтоном:

1 – залізобетонний понтон; 2 – металева башта; 3, 4 – хрестоподібна заставна деталь для кріплення зовнішнього і внутрішнього бортів башти відповідно; 5 – зовнішній і внутрішній борти башти; 6 – зовнішній борт понтона; 7 – внутрішнє поздовжнє перебирання; 8 – привальний брус; 9 – стапель-палуба; 10 – шпангоут; 11 – сталевий бімс; 12, 13, 14 – металеві ребра, які встановлені для збільшення зчеплення бетону хрестоподібними заставними деталями

Конструювання конструкції плавучого доку виконувалося за наступною послідовністю: виконання конструктивного компонування понтона і башт; визначення розрахункових навантажень, що викликають місцеві та загальні деформації корпусних конструкцій; проектування конструкцій доку з умови забезпечення місцевої міцності і стійкості з урахуванням обмежень за мінімальною товщиною; проектування конструкцій, що забезпечують загальну поперечну і поздовжню міцність понтона. В результаті розроблено конструкцію композитного доку зі зменшеною кількістю набору у понтоні доку арматури, що працює на місцеву міцність, установлюється зовні в напрямку найменшого прольоту, а арматури, що працює на загальну міцність, установлюється всередині елемента конструкції понтона. На рисунку 4 представлена удосконалена конструкція вузла з'єднання башти та понтона [14].

До встановлення на понтон блок-секцій у них умонтовують основне корпусне насичення і виконують випробування на непроникність внутрішньосекційних з'єднань. Усі блок-секції облаштовують від міделя в ніс і корму. Після проведення випробувань у них установлюють механізми, трубопроводи й устаткування. Основний принцип, закладений у технологію механомонтажних і трубомонтажних робіт – максимальний перенос підготовчих обсягів цих робіт з доку в цехи і на добудовчу набережну. Більший обсяг робіт у баштах доку виконують великоблочним методом на базі макетування найбільш насичених приміщень. Це здійснюють шляхом модульно-агрегатного методу проектування і монтажу енергетичних комплексів доку.

Корпус доку складається із залізобетонного понтона (днище, зовнішня обшивка, внутрішні поздовжні і поперечні конструкції) і двох сталевих башт (зовнішня і внутрішня обшивка, палуби, платформи, перегородки і набір, що підкріплює їх). Під час експлуатації доку на його корпус діє маса самого доку, сили підтримки, маса баласту, тиск судна, яке докується, вітрове навантаження, а під час перегону морем док отримує додаткові зусилля від вигину і кручення, хвильових ударних навантажень. При розрахунку основних зв'язків, що сприймають навантаження від судна, що докується, вважають, що зовнішні сили, які

діють на систему док-судно, сприймаються корпусом доку і судна. Загальний момент, що вигинає, на міделі системи док-судно розподіляється між корпусом доку і судном пропорційно їх міцності. Тому за розрахунковий момент, що вигинає, приймають менший з моментів, який може виникнути під час експлуатації. При докуванні судна частина моменту, що вигинає, може бути понижена прийомом баласту. Величину вигину в допустимих межах зазвичай утримують прийомом водяного баласту.

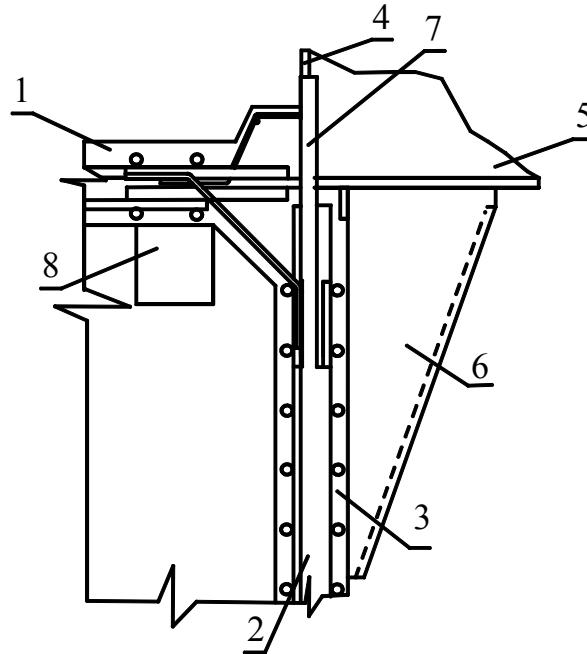


Рисунок 4 – Удосконалена конструкція вузла з'єднання башти та понтона:

1 – стапель-палуба; 2 – понтон; 3 – зовнішня стінка понтона; 4 – полотно башти; 5 – бімс; 6 – книця, 7 – заставна деталь для кріплення зовнішнього та внутрішнього бортів башти; 8 – виріз для води

При створенні монтажних блоків (агрегатів) прийняте функціональне угруповання механізмів, арматури, трубопроводів і приладів. Кількість монтажних блоків, їх взаємне розташування в приміщеннях енергетичного комплексу доку, раціональне розташування комунікацій між блоками й агрегатами визначають шляхом розробки і виготовлення макета. У районах машинного і компресорного відділень, приміщення перетворювачів передбачають укрупнені блоки масою до 50 т у спеціальних каркасах. Формування більших блоків і агрегатів здійснюють на ділянці агрегування. Блоки й агрегати завантажують у блок-секції башти до їх накриття об'ємними секціями, розташованими вище палуб або платформ.

Понтон доку ділять поздовжніми водонепроникними перегородками на декілька самостійних відсіків, які потрібні для забезпечення необхідної остійності при спливанні або зануренні доку без крену і кількістю яких залежить від вантажопідйомності доку. Вони є основними зв'язками, що сприймають навантаження від центральної і бічних кільових доріжок. Центральну кільову доріжку розміщують над діаметральною перегородкою. Водонепроникні поперечні перегородки встановлюють на відстані 1,5 м одна від одної. Рамні шпангоути башт є продовженням поперечного набору понтонів. На краях понтона для збільшення робочої довжини стапель-палуби, яка зазвичай складає 0,8–0,9 довжини судна, встановлюють майданчики (кріноліни) з дерев'яним або металевим настилом.

При встановленні і стикуванні секцій між собою повинна бути забезпечена система контролю за точністю стикування по висоті і горизонталі. Кінцевий монтаж механізмів, пристроїв і трубопроводів виконується після закінчення складально-зварювальних робіт по корпусу доку, фундаментам і підкріпленням у районі їх штатного установа. Перед

установлення опалубки арматура стику повинна бути очищена від бруду, масел, фарби, іржі. Кромки секцій усіх елементів понтона і весь бетон конструкцій, що потрапляють у стик, повинні бути звільнені від цементної плівки шляхом насічки пневмоінструментом.

Після очищення стиків та установлення всіх закладних конструкцій проводиться встановлення деревометалевої опалубки, яка повинна відповідати наступним вимогам:

- забезпечувати правильність форм і розмірів бетонованого стику;
- мати достатню міцність і твердість;
- не допускати витікання цементного молока при ущільненні бетонної суміші;
- вільно розбиратися з мінімальними пошкодженнями.

У конструкції понтона доку зі зменшеною металоємністю поперечні перегородки встановлюють на відстані 3 м одна від одної, а конструкція нижньої бетонної частини башт доку виконується без використання традиційних шпангоутів, флорів і бімсів, арматура, яка працює на місцеву міцність, встановлюється зовні в напрямку найменшого прольоту, а арматура, що працює на загальну міцність, встановлюється всередині елемента конструкції понтона. Продовжуючи розробки [14], удосконалено вузол з'єднання днища понтона з поперечною діафрагмою (рис. 5).

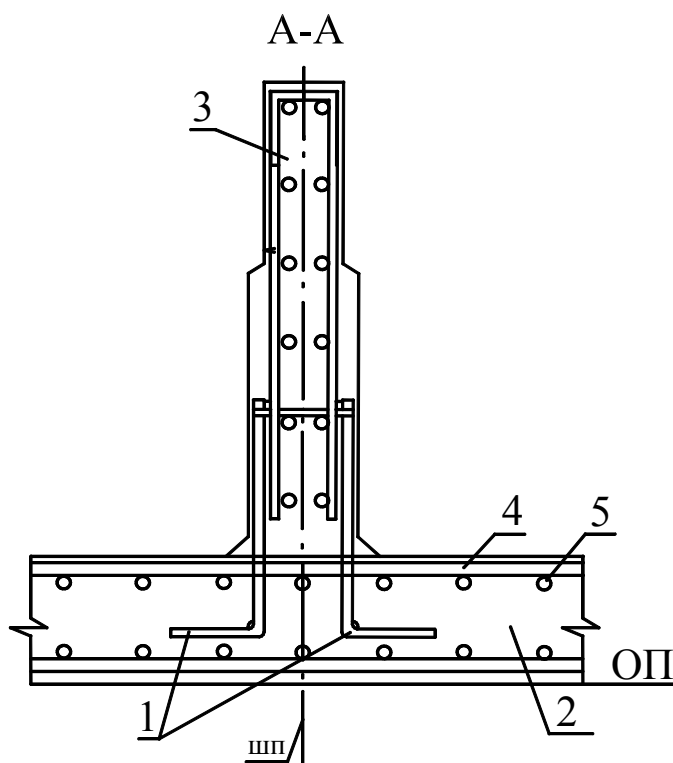


Рисунок 5 – Удосконалена конструкція вузла з'єднання днища понтона з поперечною діафрагмою:

1 – заставна деталь для кріплення зовнішнього та внутрішнього бортів башти; 2 – залізобетонний понтон; 3 – поперечна діафрагма; 4 – продольна арматура; 5 – поперечна арматура

У всіх випадках бетон міжсекційних з'єднань повинен мати міцність, водонепроникність і морозостійкість не менше необхідних для бетону сполучних елементів понтона. Укладання бетону в форми проводиться не пізніше 45 хвилин після його виготовлення (в літній період). Укладання бетону у вертикальні стики повинно проводитися на всю висоту стику. Після укладання бетону виконують його ущільнення шляхом вібрації за допомогою пневмовібраторів. Перерви при укладанні бетону в одну конструкцію не повинні перевищувати 1 годину за температури зовнішнього повітря більше 25 °С, в інших випадках не більше 2-х годин. У разі більш тривалих перервах бетонування повинно бути припинено й відновлено після закінчення твердіння бетону й

насічки (поновлення) штраби. Розпалубку стиків виробляти після досягнення бетоном вертикальних стиків 35 % і горизонтальних 50 % проектної міцності.

При підготовці під бетонування секцій проводиться очищення та продування повітрям поверхні стенду. Потім на стенді розмічаються базові та контурні лінії. Робоча частина стенду і опалубка змащуються універсальним мастилом підігрітим до 45–50 ° в будь-який час року для зменшення зчеплення зі стендом. Після цього встановлюються фіксатори захисного шару, контурна опалубка, укладається об'ємна секція на стенд в контурну опалубку. Бетонна суміш до формувальних стендів подається в віброємностях, проводиться укладання та заглажування бетону під рейку, ущільнення виконується глибинними і плоскими вібраторами. Потім проводиться термічна обробка бетону (в холодну пору року при температурі повітря нижче + 8 °С). Міцність бетону повинна бути не менше 75 % від марочної. Після виконання демонтажу опалубки знімання секцій зі стенду здійснюється краном відповідної вантажопідйомності з використанням траверс, що забезпечують рівномірний підйом з усього майданчика. Зачеплення тросів повинно виконуватись за всі рими на секції. Відрив секцій від стенду, бетонованих ребрами вниз, здійснюється за допомогою пневмовиштовхувачів.

Після зняття контурної опалубки секція подається на майданчик для складання. Перед подачею секцій на стапельні складання всі торці секцій, які стикуються, піддаються механічній обробці (насічці) відповідно до вимог галузевої документації. Складання плоских і об'ємних секцій проводиться на інвентарних прокладках з кроком 1 м. Товщина прокладок повинна бути більше висоти виступаючих частин, але не менше 25 мм.

Перед формуванням понтона необхідно перевірити стан стапельної основи щодо горизонтальній площини з нанесенням базових і контрольних ліній на корінних лісах. Спочатку на стапелі виставляються і омоноличуються секції днищової плити, а потім виконується укладання, установка та розкріплення секцій. При необхідності виконується повторна обробка кромки секцій шляхом насічки бетону механічним способом (пневмоінструментом). Виконується армування і зварювання арматури стиків та монтаж опалубки стиків омоноличування. Після цього бетонуються стики та проводиться ущільнення бетону глибинними вібраторами і вібрацією опалубки. Монтаж вертикальних збірних елементів (борта і перебірки) на днище виконується після набору міцності бетону монтажних стиків днища 21 МПа (210 кг/см²) або ж до бетонування стиків з метою запобігання утворенню тріщин або порушення контакту арматури з бетоном [15].

Усунення дефектів бетонування повинно здійснюватись за допомогою повного видалення всього нетривкого бетону і наступним закладенням дефектного місця бетоном такої ж якості, який вживався для бетонування міжсекційних з'єднань. Дефекти у вигляді тріщин або невеликих отворів повинні бути попередньо оброблені по кромках на величину, достатню для якісного заповнення їх бетоном на всю глибину. Випробування на водонепроникність залізобетонного корпусу понтона проводиться після усунення дефектів, виявлених зовнішнім оглядом і закінчення монтажу закладного і приварного насичення.

Висновки з перспективами. Розглянуто відомі технічні рішення у докобудуванні, які направлені на раціоналізацію виробничих процесів при побудові конструкцій композитних доків. Виконано обґрунтування раціональності побудови конструкції понтона без встановлення шпангоутів, флорів та бімсів під баштами і описано технологічні рекомендації щодо встановлення поперечних перегородок між внутрішніми бортами через 4 шпациї.

Розроблено конструктивно-технологічні вузли з'єднання понтону з металевою баштою та поперечною діафрагмою для конструкції плавучого композитного доку зі

зменшеною кількістю набору у понтоні, що дає змогу зниження металоємності конструктивних вузлів з'єднання понтону та композитного доку у цілому.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Rashkovskiy A., Ermakov D., Dong Z. Innovative technologies in composite floating docks construction. *Shipbuilding and Marine Infrastructure*. 2014. № 2. pp. 93–102.
2. Щедролосев А. В., Кириченко К. В. Анализ состояния строительства плавучих доков. *Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyasının Elmi Əsərləri*. 2018. № 1. С. 48–58.
3. Мишутин Н. В., Мишутин А. В. Железобетонные плавучие сооружения и перспективы их использования. *Вісник ОДАБА*. 2002. №6. С. 181–187.
4. Слущкий Н. Г. Состояние и перспективы строительства композитных плавучих сооружений. *Материалы международной научно-технической конференции «Безопасность мореплавания и ее обеспечение при проектировании и постройке судов»*. Николаев : НУК, 2004. С. 85–87.
5. Рашковский А. С., Слущкий Н. Г. Инновационные технологии в докостроении. *Вісник НУК*. 2010. № 1. Режим доступа : <http://evn.nuos.edu.ua/article/view/24572/22079>.
6. Кириченко К. В., Яглицкий Ю. К., Щедролосев О. В. Особливості параметричного проектування конструкцій композитного плавучого доку. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії : науковий журнал*. Херсон : Херсонська державна морська академія, 2018. № 2 (19). С. 154–164.
7. Wang C.M., Utsunomiya T. Pontoon-type very large floating structures. *Structural Engineer*. 2007. № 85 (16). pp. 15–17.
8. Firat Y., Easley R., Zinserling M. Design and Construction of Two Concrete Pontoons to Serve as Berths at the Port of Juneau Cruise Ship Terminal Ports 2016: Port Planning and Development. *Papers from Sessions of the 14th Triennial International Conference*. 2016. pp. 193–203.
9. Zhang X.X., Du B.S., Wu Z.L. Safety protective effect of a novel FRP floating pontoon for piers against ship-collision. *Bridge Maintenance, Safety, Management and Life Extension – Proceedings of the 7th International Conference of Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS*. 2014. pp. 2070–2078. Retrieved from: <https://doi.org/10.1201/b17063-319>
10. Xujun Chen, Yuji Miao, Xuefeng Tang and Junyi Liu. Numerical and experimental analysis of a moored pontoon under regular wave in water of finite depth. *Ships and Offshore Structures*. 2016. Volume 12. Issue 3. pp. 412–423.
11. Слущкий Н. Г. Новые направления в проектировании и технологии строительства композитных плавучих доков большой подъемной силы. *Матер. науч. симпоз. «Актуальные проблемы проектирования и эксплуатации судов»*. Одесса : Черноморье, 2008. С. 18–23.
12. Нейман В. М. Обеспечение качества строительства композитных плавучих доков. *Збірник наукових праць НУК*. 2017. № 1. С. 3–9.
13. Проектирование, технология и организация строительства композитных плавучих доков : монография / А. С. Рашковский и др. ; под науч. ред. А. С. Рашковского. Николаев : НУК, 2008. С. 22–38.
14. Щедролосев О. В., Коннов В. М., Узлов О. М., Кириченко К. В. Удосконалення конструктивного вузла з'єднання металевої башти із залізобетонним понтоном. *Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд»*. Миколаїв: НУК, 2020. С. 135–139.

15. Щедролюсєв О. В., Кириченко К. В. До питання побудови плаваючих композитних доків зі зменшеною кількістю набору у понтоні. *Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті MINTT-2020»*. Херсон : ХДМА, 2020. С. 281–283.

REFERENCES

1. Rashkovskiy, A., Ermakov, D. & Dong, Z. (2014). Innovative technologies in composite floating docks construction. *Shipbuilding and marine infrastructure*, 2, 93–102.
2. Shchedrolosiev, A. V., & Kyrychenko, K. V. (2018). Analiz sostoyaniya stroitel'stva plavuchikh dokov [Analysis of the state of construction of floating docks]. *Azerbaijan State Marine Academy*, 1, 48–58 [in Russian].
3. Mishutin, N. V., & Mishutin, A. V. (2002). Zhelezobetonnye plavuchie sooruzheniya i perspektivy ih ispol'zovaniya [Reinforced concrete floating structures and prospects for their use]. *Visnyk ODABA*, 6, 181–186 [in Russian].
4. Slutskiy, N. G. (2004). Sostoyanie i perspektivy stroitelstva kompozitnykh plavuchih sooruzheniy [Status and prospects of the construction of composite floating structures]. Materials of the international scientific and technical conference «Safety of navigation and its provision in the design and construction of ships». *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Bezopasnost moreplavaniya i ee obespechenie pri proektirovanii i postroyke sudov»*. (pp. 85–87). Nikolaev : NUOS [in Russian].
5. Rashkovskiy, A. S. (2004). Innovatsionnyie tehnologii v dokostroenii [Innovative technologies in dockbuilding]. *Visny`k NUK*, № 1. *Retrieved from* <http://evn.nuos.edu.ua/article/view/24572/22079>
6. Kyrychenko, K. V., Yahlytskyi, Yu. K., Schedrolosiev, O. V. (2018). Osobly`vosti parametry`chnogo proektuvannya konstrukcij kompozy`tnogo plavuchogo doku [Features of parametric design of composite floating dock structures]. *Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii*, 2 (19), 154–164.
7. Wang, C.M. (2007). Utsunomiya, T. Pontoon-type very large floating structures. *Structural Engineer*, 85 (16), 15–17.
10. Firat, Y., Easley, R., Zinserling, M. (2016). Design and Construction of Two Concrete Pontoons to Serve as Berths at the Port of Juneau Cruise Ship Terminal Ports 2016: Port Planning and Development. Papers from Sessions of the 14th Triennial International Conference, 193–203.
11. Zhang, X.X., Du, B.S., Wu, Z.L. (2014). Safety protective effect of a novel FRP floating pontoon for piers against ship-collision. *Bridge Maintenance, Safety, Management and Life Extension – Proceedings of the 7th International Conference of Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS, 2070–2078*. <https://doi.org/10.1201/b17063-319>.
12. Xujun, Chen, Yuji, Miao, Xuefeng, Tang and Junyi, Liu. (2016). Numerical and experimental analysis of a moored pontoon under regular wave in water of finite depth. *Ships and Offshore Structures*, 12, 3, 412–423.
13. Rashkovskiy, A. S., Slutskiy, N. G., Konnov, V. N., Shchedrolosiev, A. V., & Uzlov, O. N. (2015). Proektirovanie, tekhnologiya i organizatsiya stroitel'stva kompozitnykh plavuchikh dokov : monografiya. Nikolaev, 22–38. [in Russian].
14. Shchedrolosiev, O. V., Konnov V. M., Uzlov, O. M., Kyrychenko, K. V. (2020). Udoskonalennya konstrukty`vnogo vuzla z'yednannya metalevoyi bashty` iz zalizobetonny`m pontonom [Improvement of the structural unit of connection of the metal tower with the reinforced concrete pontoon]. Proceedings of the All-Ukrainian scientific and technical conference with international participation «Modern technologies for the design, construction, operation and repair of ships, marine equipment and engineering structures»: *Materialy` Vseukrayins`koyi naukovoy-*

texnichnoyi konferenciyi z mizhnarodnoyu uchastyu «Suchasni texnologiyi proektivannya, pobudovy, ekspluatatsiyi i remontu suden, mors'ky`x texnichny`x zasobiv i inzhenerny`x sporud». (pp. 135-139). My`kolayiv: NUOS.

15. Shchedrolosiev, O. V., Kyrychenko, K. V. (2020). Do py`tannya pobudovy` plavuchy`x kompozy`tny`x dokiv zi zmenshenoyu kil`kisty naboru u pontoni. [On the question of building floating composite docks with a reduced number of sets in the pontoon]. *Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference «Modern Information and Innovative Technologies in Transport MINTT-2020»: Materialy` XII Mizhnarodnoyi naukovy`chnoyi konferenciyi «Suchasni informacijni ta innovacijni texnologiyi na transporti MINTT-2020».* (pp. 281-283). Kherson: KSMA.

Щедроловсєв А. В., Узлов А. Н., Кириченко К. В. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УЗЛОВ СОЕДИНЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ПОНТОНА С ПОПЕРЕЧНОЙ ДИАФРАГМОЙ И МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ БАШНЕЙ ПЛАВУЧЕГО КОМПОЗИТНОГО ДОКА

Выполнен анализ известных технических решений в докостроении, направленных на рационализацию производственных ресурсов при построении конструкций композитных доков. Установлено, что в имеющихся решениях не указаны рекомендации уменьшения металлоемкости железобетонного понтона композитных плавучих доков. В результате проведенного исследования, усовершенствована конструкция плавучих композитных доков за счет уменьшения количества набора в железобетонном понтоне. Обосновано рациональность построения конструкции понтона без установки шпангоутов, флоры и бимсов под башнями и описаны технологические рекомендации установления поперечных перегородок между внутренними бортами через 4 шпации, то есть через 3 метра в отличие от классической конструкции в которой расстояние между перегородками 1,5 метра. Проведен анализ особенностей конструирования узлов соединения железобетонного понтона с поперечной диафрагмой и металлической башней плавучего композитного дока, описаны сложности, которые при этом возникают. Разработана конструкция и технологические рекомендации построения узлов соединения железобетонного понтона с поперечной диафрагмой и металлической башней. Описаны последовательность конструирования конструкции плавучего дока и технологические операции для обеспечения прочности, водонепроницаемости и морозостойкости бетона при межсекционных соединениях. Разработаны решения для увеличения местного сцепления бетона с крестообразными деталями и предотвращения его отслаивания. Приведена традиционная схема конструкции композитного дока и конструктивного узла соединения металлической башни с железобетонным понтоном. Усовершенствована схема композитного дока, схемы конструкции узлов соединения железобетонного понтона с поперечной диафрагмой и металлической башней, которые предназначены для построения плавучих композитных доков с уменьшенной металлоемкостью в понтоне.

Ключевые слова: композитный плавучий док, железобетонный понтон, металлическая башня, поперечная диафрагма, конструирование доков.

Shchedrolosiev O., Uzlov O., Kyrychenko K. IMPROVING CONSTRUCTIVE AND TECHNOLOGICAL CONNECTING JOINTS OF REINFORCED CONCRETE PONTOON WITH A TRANSVERSE DIAPHRAGM AND A METAL TOWER IN A FLOATING COMPOSITE DOCK

The analysis of the known technical decisions in dock construction field, rationalizing production resources at composite docks construction is given. It is established that the available solutions do not specify the recommendations for lowering the metal content in the reinforced concrete pontoon of composite floating docks. As a result of the conducted research, the design of floating composite docks was improved by reducing sets in the reinforced concrete pontoon. The rationality of a pontoon design construction without installation of frames, floors, and beams under towers is substantiated. Technological recommendations for the transverse partitions installation between the inner boards in 4 spaces, i.e. in 3 meters in contrast to the classical design in which the distance between the partitions is 1.5 meters, were described. The analysis of the design features of the reinforced concrete pontoon connecting joints with the transverse diaphragm and the metal tower of the floating composite dock is carried out, the difficulties that arise are described. The design and technological recommendations for the construction of the reinforced concrete pontoon joints with the transverse diaphragm and the metal tower have been developed. The floating dock construction

sequence and technological operations ensuring concrete's strength, water tightness and frost resistance at intersection joints are described. Solutions that increase the local adhesion of concrete to cross-shaped parts and prevent its exfoliation have been developed. The traditional scheme of the composite dock construction and a structural joint of a metal tower with a reinforced concrete pontoon is given. The composite dock construction scheme and the construction scheme of the joints of the reinforced concrete pontoon with the transverse diaphragm and the metal tower, which are designed for the construction of floating composite docks with reduced metal content in the pontoon, have been improved.

Keywords: *composite floating dock, reinforced concrete pontoon, metal tower, transverse diaphragm, dock construction.*

© Щедролюсєв О. В., Узлов О. М., Кириченко К. В.

Статтю прийнято
до редакції 22.06.20

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

СТВОРЕННЯ НАНОНАПОВНЕНИХ ЕПОКСИ-ПОЛІЕФІРНИХ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ЗАХИСТУ ЕЛЕМЕНТІВ СУДНОВИХ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ

Брайло М. В., к.т.н., доц. кафедри транспортних технологій та механічної інженерії Херсонської державної морської академії, e-mail: mv.brailo@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8167-9999;

Якущенко С. В., старший викладач кафедри природничо-наукової підготовки Херсонської державної морської академії, e-mail: yakushchenko.sv@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1724-8171;

Кобельник О. С., к.т.н., викладач Технічного коледжу Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, e-mail: os.kobelnyk@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9574-3250;

Букетова Н. М., к.т.н, докторант кафедри транспортних технологій та механічної інженерії Херсонської державної морської академії, e-mail: nata.buketova@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7670-6590;

Вороненко С. В., старший викладач кафедри експлуатації суднового електрообладнання та засобів автоматики Херсонської державної морської академії, e-mail: vr.sergey@ukr.net, ORCID: 0000-0001-9606-6538

В роботі досліджено вплив нанонаповнювачів на теплофізичні властивості епоксидно-поліефірних композитів. Вміст наповнювачів (окиснена нанодисперсна добавка та пірогенний діоксид кремнію) змінювали в межах $q = 0,02 \dots 1,0$ мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру марки ЕД-20. Досліджено, що введення в епоксидно-поліефірний зв'язувач окисненої нанодисперсної добавки у кількості $q = 0,05 \dots 0,08$ мас.ч. приводить до підвищення теплофізичних властивостей композиту. Показник теплостійкості (за Мартенсом) за вмісту окисненої нанодисперсної добавки $q = 0,075$ мас.ч. становив $T = 346$ К. Введення $q = 0,05$ мас.ч. окисненої нанодисперсної добавки дозволяє отримати поліпшені показники температурного коефіцієнту лінійного розширення у різних температурних діапазонах: у області $\Delta T = 303 \dots 323$ К $-\alpha = 1,0 \times 10^{-5}$ К⁻¹, у області $\Delta T = 303 \dots 373$ К $-\alpha = 1,9 \times 10^{-5}$ К⁻¹, у області $\Delta T = 303 \dots 423$ К $-\alpha = 3,4 \times 10^{-5}$ К⁻¹. Констатовано, що за вмісту $q = 0,05$ мас.ч. нанонаповнювача пірогенний діоксид кремнію композитний матеріал також відрізняється поліпшеними показниками теплостійкості (за Мартенсом), яка становить $T = 347$ К та мінімальними показниками термічного коефіцієнту лінійного розширення. Показники температурного коефіцієнту лінійного розширення становлять: $\alpha = 1,0 \times 10^{-5}$ К⁻¹ у області ($\Delta T = 303 \dots 323$ К), $\alpha = 1,9 \times 10^{-5}$ К⁻¹ (у області $\Delta T = 303 \dots 373$ К), $\alpha = 3,4 \times 10^{-5}$ К⁻¹ (у області $\Delta T = 303 \dots 423$ К), $\alpha = 8,4 \times 10^{-5}$ К⁻¹ (у області $\Delta T = 303 \dots 473$ К). Рекомендовано, що з метою формування композитного матеріалу із поліпшеними теплофізичними властивостями для захисту елементів суднових технічних засобів доцільно вводити в епоксидно-поліефірний зв'язувач нанонаповнювач пірогенний діоксид кремнію у кількості $q = 0,05$ мас.ч.

Ключові слова: епоксидно-поліефірна матриця, композитний матеріал, нанонаповнювачі, теплофізичні властивості, теплостійкість (за Мартенсом), термічний коефіцієнт лінійного розширення, окиснена нанодисперсна добавка, пірогенний діоксид кремнію, зв'язувач.

DOI: 10.33815/2313-4763.2020.1.22.144-152

Постановка проблеми. На сьогодні одним із ефективних та економічно вигідних засобів перевезення вантажів є водний транспорт, зокрема, судна різного призначення [1]. Важливим елементом судна є енергетична установка [1–3]. Для безперебійної та надійної роботи суднової енергетичної установки (СЕУ) необхідним є дотримання її температурного балансу, який забезпечується системою охолодження. Одним із основних конструктивних елементів системи охолодження є теплообмінні апарати. Водночас, слід зазначити, що деталі теплообмінників працюють в складних умовах за рахунок постійного контакту з агресивним середовищем (морської та річкової води) та змінних температур. Умови використання призводять до руйнування конструктивних елементів теплообмінних апаратів, тому важливим є їх захист та відновлення технічного стану [3]. З цією метою доцільним є використання полімерів [4–6]. Водночас, основна проблема виникає в тому, що

постійна зміна температури призводить до розшарування системи «покриття-основа» та його руйнування [4, 5]. Тому питання створення полімерного матеріалу з поліпшеними теплофізичними властивостями, який дозволить захистити поверхні конструктивних елементів теплообмінних апаратів в умовах зміни температур та впливу агресивного середовища є актуальним і перспективним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні використання полімерних матеріалів, як захисних покриттів, має вагоме місце у багатьох галузях промисловості, зокрема суднобудуванні [4–10]. Одним із перспективних напрямів є використання захисних покриттів із реактопластичних матеріалів на основі епоксидних та поліефірних смол. В тому числі актуальним є застосування багатокомпонентних полімерних систем до складу яких можуть входити декілька смол різної природи [4, 6, 8, 11, 12]. З метою поліпшення фізико-механічних та теплофізичних властивостей у реактопласти додають модифікатори, пластифікатори та наповнювачі різної природи [8, 9, 11–13]. На сучасному етапі розвитку промисловості ефективним є застосування нанонаповнювачів в реактопластичному зв'язувачі [7, 8, 10, 12]. Водночас вплив наночасток на теплофізичні властивості багатокомпонентних епокси-поліефірних композитів вивчено не достатньо. Тому актуальним є створення нанонаповнених епокси-поліефірних композитних матеріалів з поліпшеними теплофізичними властивостями, що дозволить їх використати для захисту елементів судових технічних засобів та підвищити їх експлуатаційні характеристики.

Мета роботи – розробити нанонаповнені епокси-поліефірні композитні матеріали з поліпшеними теплофізичними властивостями для підвищення надійності засобів транспорту для захисту та відновлення елементів судових технічних засобів.

Матеріали та методика дослідження. З метою формування матриці для КМ з поліпшеними фізико-механічними та теплофізичними властивостями використовували наступні компоненти.

1. Основним компонентом зв'язувача вибрано низькомолекулярний епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20 ($q = 100$ мас.ч.). Слід зазначити, що молекули епоксидних олігомерів містять гліцидиллові та епоксидні групи, які здатні, взаємодіючи з твердником, формувати зшити структуру в матеріалах у вигляді сітки [4,8,14].

2. Ортофталева ненасичена передприскорена литтєва поліефірна смола Norsodyne O 12335 AL ($q = 20$ мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20).

3. Твердник холодного тверднення епоксидних смол поліетиленполіамін (ПЕПА) (ТУ 6-05-241-202-78) (10 мас.ч. на 100 мас.ч. ЕД-20).

4. Твердник для поліефірних смол – Бутанокс-М50 (Butanox-M50), що є перекисом метилетилкетону ($q = 1$ мас.ч. на 100 мас.ч. поліефірної смоли Norsodyne O 12335).

5. Окиснена нанодисперсна добавка (ОНД) з дисперсністю $d = 5 \dots 8$ нм. Хімічний склад елементів ОНД: карбонат кальцію (CaCO_3) – 57,23 %, вуглець (графіт, сажа) – 33,18 %, хлорид калію (KCl) – 9,59 %.

6. Пірогенний діоксид кремнію (ПДК) – високодисперсний, високоактивний, аморфний, пірогенний діоксид кремнію (SiO_2), який одержують полум'яним гідролізом чотирихлористого кремнію (SiCl_4) високої чистоти ($d = 7 \dots 12$ нм).

З метою встановлення оптимального вмісту нанонаповнювачів у епокси-поліефірному зв'язувачі досліджено теплофізичні властивості КМ. Вміст нанонаповнювачів змінювали у межах: $q = 0,02 \dots 1,0$ мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру марки ЕД-20.

У роботі досліджено наступні теплофізичні властивості: теплостійкість (за Мартенсом), термічний коефіцієнт лінійного розширення.

Теплостійкість (за Мартенсом) КМ визначали згідно ГОСТ 21341-75. Методика дослідження полягає у визначенні температури, при якій досліджуваний зразок нагрівали зі швидкістю $v = 3$ К/хв під дією постійного згинаючого навантаження $F = 5 \pm 0,5$ МПа, внаслідок чого він деформується на задану величину ($h = 6$ мм).

Термічний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР) зразків розраховували за кривою залежності відносної деформації від температури, апроксимуючи цю залежність експоненціальною функцією. Відносну деформацію визначали за зміною довжини зразка при підвищенні температури у стаціонарних умовах (ГОСТ 15173-70). Розміри зразків для дослідження: $65 \times 12 \times 12$ мм, непаралельність шліфованих торців складала не більше 0,02 мм. Перед дослідженням вимірювали довжину зразків з точністю $\pm 0,01$ мм. Швидкість нагрівання становила $v = 2$ К/хв.

Епокси-поліефірні композити з нанонаповнювачами формували за такою технологією з виконанням температурно-часових режимів: попереднє дозування епоксидної діанової смоли ЕД-20 та поліефірної смоли Norsodyne O 12335 AL, підігрівання смоли та нанонаповнювачів до температури $T = 353 \pm 2$ К і витримка компонентів при даній температурі упродовж часу $t = 20 \pm 0,1$ хв; дозування наповнювача та подальше введення його в зв'язувач; гідродинамічне суміщення зв'язувача і волокнистого наповнювача впродовж часу $t = 1 \pm 0,1$ хв; ультразвукова обробка (УЗО) композиції упродовж часу $t = 1,5 \pm 0,1$ хв; охолодження композиції до кімнатної температури впродовж часу $t = 60 \pm 5$ хв; введення твердника ПЕПА та Butanox-M50 і перемішування композиції впродовж часу $t = 5 \pm 0,1$ хв. Надалі затверджували КМ за експериментально встановленим режимом: формування зразків та їх витримування впродовж часу $t = 12,0 \pm 0,1$ год за температури $T = 293 \pm 2$ К, нагрівання зі швидкістю $v = 3$ К/хв до температури $T = 393 \pm 2$ К, витримування КМ впродовж часу $t = 2,0 \pm 0,05$ год, повільне охолодження до температури $T = 293 \pm 2$ К. З метою стабілізації структурних процесів у КМ зразки витримували впродовж часу $t = 24$ год на повітрі за температури $T = 293 \pm 2$ К з наступним проведенням експериментальних випробувань.

Результати досліджень та їх обговорення. На початковому етапі досліджували теплостійкість (за Мартенсом) композитних матеріалів за різного вмісту нанонаповнювача ОНД (рис. 1, крива 1). Експериментально встановлено, що при введенні даного наповнювача стійкість матеріалів до впливу температури зростає порівняно з епокси-поліефірною матрицею. Максимальними значеннями відрізняється матеріал за вмісту наночастинок ОНД у кількості $q = 0,06 \dots 0,08$ мас.ч. При цьому показники теплостійкості (за Мартенсом) підвищуються від $T = 335$ К (для епокси-поліефірної матриці) до $T = 346$ К за вмісту $q = 0,075$ мас.ч. ОНД. Подальше введення нанонаповнювача призводить до зниження показника теплостійкості, однак не суттєво. За вмісту наповнювача у кількості $q = 0,1 \dots 0,5$ мас.ч. показники теплостійкості (за Мартенсом) становлять $T = 345$ К, а за вмісту $q = 0,75 \dots 1,0$ мас.ч. – $T = 344$ К.

Аналізуючи отримані експериментальні результати дослідження теплостійкості (за Мартенсом) КМ, наповнених частками пірогенного діоксиду кремнію (рис. 1, крива 2), можна констатувати наступне. Встановлено динаміку підвищення показників вже за мінімального вмісту добавки. Зокрема, за вмісту часток у кількості $q = 0,02$ мас.ч. значення теплостійкості КМ зростає до $T = 347$ К. Проте, максимальними значеннями ($T = 349$ К) відрізняється композит за вмісту наповнювача ПДК у кількості $q = 0,075$ мас.ч. Подальше введення часток нанонаповнювача призводить до зниження показника теплостійкості (за Мартенсом). За вмісту ПДК у кількості $q = 0,1 \dots 1,0$ мас.ч. значення становлять $T = 337 \dots 339$ К. Слід зауважити, що динаміка отриманих теплостійкості (за Мартенсом) КМ, наповнених ОНД та ПДК корелює. Максимальними показниками відрізняються матеріали у діапазоні одного і того ж вмісту ($q = 0,075$ мас.ч.). Тому можна припустити, що механізм впливу нанодобавок на теплостійкість матеріалів є подібним для двох наповнювачів. Оскільки використовували диспергування нанонаповнювачів у композиціях за допомогою ультразвукової обробки, можна стверджувати про її вплив на активацію зв'язків при зшиванні матеріалів. Очевидно, що має місце синергетичний ефект у поліпшенні властивостей КМ внаслідок впливу ультразвукової обробки композицій і нанонаповнювача за оптимального вмісту, що приводить до підвищення теплостійкості (за Мартенсом) композитів.

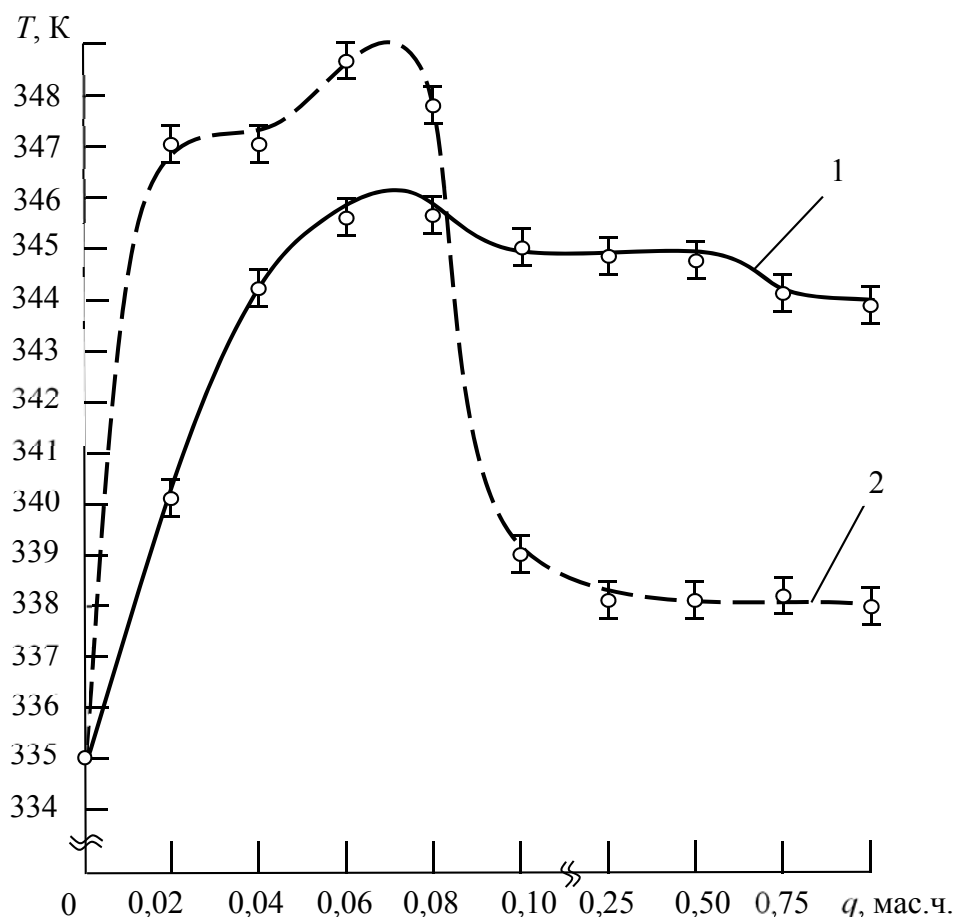


Рисунок 1 – Залежність теплостійкості за Мартенсом (T) епокси-поліефірних КМ від вмісту нанонаповнювачів, q , мас.ч.: 1 – ОНД; 2 – ПДК

На наступному етапі досліджували термічний коефіцієнт лінійного розширення нанонаповнених епокси-поліефірних композитних матеріалів. Визначили параметри теплового розширення досліджуваних матеріалів в температурних діапазонах: 1 – $\Delta T = 303 \dots 323$ К; 2 – $\Delta T = 303 \dots 373$ К; 3 – $\Delta T = 303 \dots 423$ К; 4 – $\Delta T = 303 \dots 473$ К (рис. 2, рис. 3). Встановлено, що за вмісту наночасток ОНД у кількості $q = 0,05$ мас.ч. (рис. 2) КМ відрізняється мінімальними показниками ТКЛР у температурних діапазонах до $T = 423$ К. Зокрема, у області $\Delta T = 303 \dots 323$ К – $\alpha = 1,0 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, у області $\Delta T = 303 \dots 373$ К – $\alpha = 1,9 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, у області $\Delta T = 303 \dots 423$ К – $\alpha = 3,4 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

У області температур $\Delta T = 303 \dots 473$ К мінімальними значеннями відрізняється КМ за вмісту $q = 0,1$ мас.ч. ОНД – $\alpha = 7,9 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. За вмісту $q = 0,05$ мас.ч ТКЛР КМ у даному діапазоні становить $\alpha = 8,4 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. Для порівняння значення ТКЛР епокси-поліефірної матриці отримали наступні: $\alpha = 1,6 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ (у області $\Delta T = 303 \dots 323$ К), $\alpha = 2,0 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ (у області $\Delta T = 303 \dots 373$ К), $\alpha = 3,8 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ (у області $\Delta T = 303 \dots 423$ К), $\alpha = 8,8 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ (у області $\Delta T = 303 \dots 473$ К), що є вищими від аналогічних показників для КМ, наповнених частками ОНД.

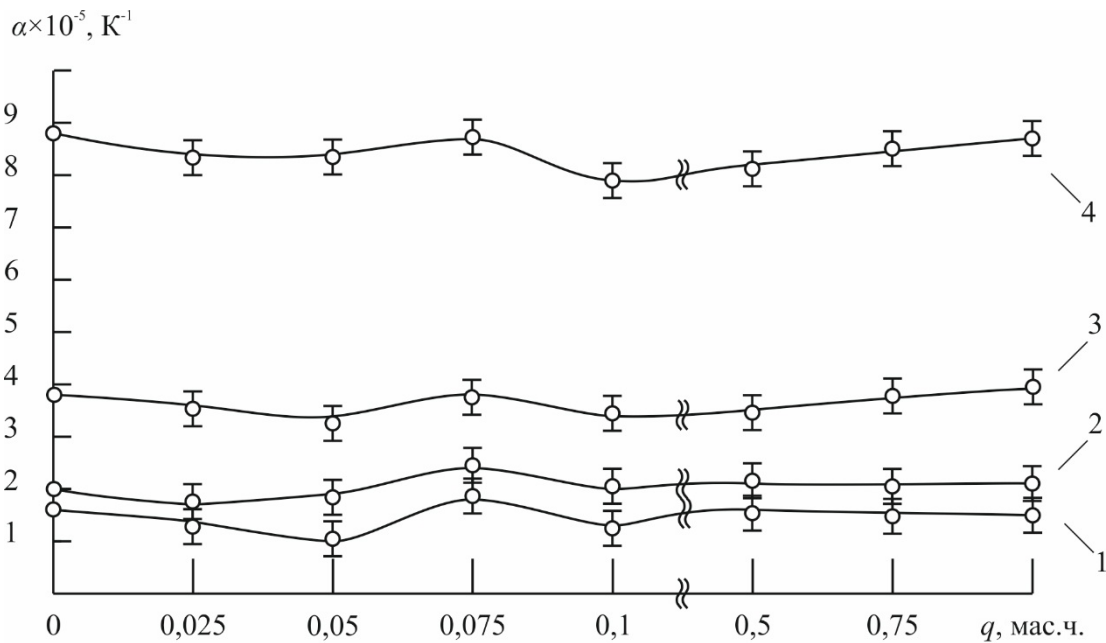


Рисунок 2 – Залежність термічного коефіцієнта лінійного розширення від вмісту окисненої нанодисперсної добавки у різних температурних діапазонах:
 1 – $\Delta T = (303 \dots 323) \text{ K}$; 2 – $\Delta T = (303 \dots 373) \text{ K}$; 3 – $\Delta T = (303 \dots 423) \text{ K}$; 4 – $\Delta T = (303 \dots 473) \text{ K}$

Результати дослідження ТКЛР композитів, наповнених частками ПДК, наведені на рис. 3.

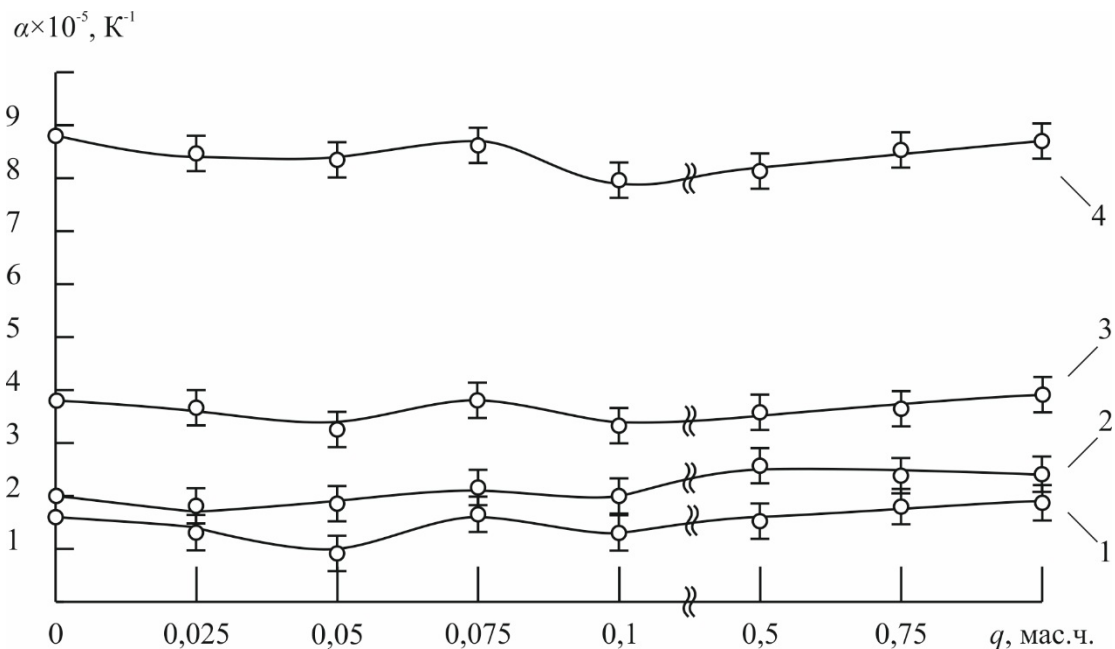


Рисунок 3 – Залежність термічного коефіцієнту лінійного розширення КМ від вмісту пірогенного діоксиду кремнію при різних температурних діапазонах:
 1 – $\Delta T = (303 \dots 323) \text{ K}$; 2 – $\Delta T = (303 \dots 373) \text{ K}$; 3 – $\Delta T = (303 \dots 423) \text{ K}$; 4 – $\Delta T = (303 \dots 473) \text{ K}$

Слід зазначити, що отримані результати є подібні за результатами для КМ, що містять нанодобавки ОНД. Це підтверджує теорію однакового синергетичного механізму впливу наноаповнювачів на показники термічного коефіцієнту лінійного розширення. Мінімальними значеннями ТКЛР також відрізняється КМ за вмісту $q = 0,05$ мас.ч. ПДК. При цьому: у області $\Delta T = 303 \dots 323 \text{ K}$ – $\alpha = 1,0 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, у області $\Delta T = 303 \dots 373 \text{ K}$ – $\alpha = 1,9 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, у області $\Delta T = 303 \dots 423 \text{ K}$ – $\Delta\alpha = 3,4 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, у області $\Delta T = 303 \dots 473 \text{ K}$ – $\alpha = 8,4 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ (рис. 3, криві 1-4). За критичного вмісту часток ПДК показники ТКЛР

підвищуються і становлять: у області $\Delta T = 303 \dots 323 \text{ K} - \alpha = 1,9 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, у області $\Delta T = 303 \dots 373 \text{ K} - \alpha = 2,4 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, у області $\Delta T = 303 \dots 423 \text{ K} - \Delta\alpha = 3,9 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, у області $\Delta T = 303 \dots 473 \text{ K} - \alpha = 8,7 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ (рис. 3, криві 1-4).

Отже, аналізуючи значення теплостійкості (за Мартенсом) нанопоповнених КМ та показники ТКЛР, встановлено, що епоксидно-поліефірний композит з частками пірогенного діоксиду кремнію відрізняється вищими показниками теплостійкості (за Мартенсом) і мінімальними значеннями ТКЛР. Зокрема, слід зауважити, що матеріал відрізняється максимальними показниками теплостійкості за вмісту $q = 0,075$ мас.ч., а мінімальними показниками ТКЛР за вмісту $q = 0,05$ мас.ч. Однак, відповідно до результатів експерименту (рис. 1, крива 2) помітно, що за вмісту добавки у кількості $q = 0,05$ мас.ч. показник теплостійкості (за Мартенсом) зменшується не суттєво і становить $T = 347 \text{ K}$. Тому, доцільно, для формування композитного матеріалу із поліпшеними теплофізичними властивостями вводити в епоксидно-поліефірний зв'язувач нанопоповнювач ПДК у кількості $q = 0,05$ мас.ч. Отримані результати корелюють з результатами попередньо досліджених фізико-механічних властивостей таких КМ.

Висновки. На основі проведених експериментальних досліджень можна констатувати наступне:

1. Встановлено, що введення наночасток окисненої нанодисперсної добавки приводить до поліпшення показників теплофізичних властивостей композитного матеріалу. Доведено, що при введенні $q = 0,075$ мас.ч. ОНД теплостійкість (за Мартенсом) композиту становить $T = 346 \text{ K}$. Проаналізовано, що мінімальними показниками ТКЛР відрізняється композит за вмісту $q = 0,05$ мас.ч. ОНД. При цьому: у області $\Delta T = 303 \dots 323 \text{ K} - \alpha = 1,0 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, у області $\Delta T = 303 \dots 373 \text{ K} - \alpha = 1,9 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, у області $\Delta T = 303 \dots 423 \text{ K} - \alpha = 3,4 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

2. Експериментально доведено, що для формування композитного матеріалу із поліпшеними у комплексі теплофізичними властивостями слід вводити в епоксидно-поліефірний зв'язувач $q = 0,05$ мас.ч. нанопоповнювача пірогенний діоксид кремнію. При цьому показник теплостійкості (за Мартенсом) становить $T = 347 \text{ K}$, ТКЛР: у області $\Delta T = 303 \dots 323 \text{ K} - \alpha = 1,0 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, у області $\Delta T = 303 \dots 373 \text{ K} - \alpha = 1,9 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, у області $\Delta T = 303 \dots 423 \text{ K} - \Delta\alpha = 3,4 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, у області $\Delta T = 303 \dots 473 \text{ K} - \alpha = 8,4 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. Результати досліджень перспективним є використовувати для подальшого формування багатокомпонентних епоксидно-поліефірних композитних матеріалів, які відрізнятимуться поліпшеними у комплексі теплофізичними та фізико-механічними властивостями для відновлення стану і захисту елементів суднових технічних засобів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Chen, X. (2019). Marine Transport Efficiency Evaluation of Cross-border E-commerce Logistics Based on Analytic Hierarchy Process. *Journal of Coastal Research*, 94(sp1), 682. <https://doi.org/10.2112/SI94-135.1>
2. Sui, C., Stapersma, D., Visser, K., de Vos, P., & Ding, Y. (2019). Energy effectiveness of ocean-going cargo ship under various operating conditions. *Ocean Engineering*, 190, 106473. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106473>
3. Возницкий, И. В., & Пунда, А. С. (2008). Судовые двигатели внутреннего сгорания. М.: Моркнига, 1, 282.
4. Кербер, М. Л., Виноградов, В. М., & Головкин, Г. С. (2014). *Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология*. ЦОП «Профессия».
5. Buketov, A., Brailo, M., Yakushchenko, S., & Saprionova, A. (2018). Development of Epoxy-Polyester Composite with Improved Thermophysical Properties for Restoration of Details of Sea and River Transport. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, 1–6. <https://doi.org/10.1155/2018/6378782>
6. Buketov, A. V., Brailo, M. V., Yakushchenko, S. V., Saprionov, O. O., & Smetankin, S. O. (2018). The formulation of epoxy-polyester matrix with improved physical and mechanical

properties for restoration of means of sea and river transport. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 1–6. <https://doi.org/10.1080/20464177.2018.1530171>

7. Salom, C., Prolongo, M. G., Toribio, A., Martínez-Martínez, A. J., de Cárcer, I. A., & Prolongo, S. G. (2018). Mechanical properties and adhesive behavior of epoxy-graphene nanocomposites. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 84, 119–125. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2017.12.004>

8. Buketov, A. V., Saprionov, A. A., Buketova, N. N., Brailo, M. V., Marushak, P. O., Panin, S. V., & Amelin, M. Y. (2018). Impact toughness of nanocomposite materials filled with fullerene C60 particles. *Composites: Mechanics, Computations, Applications: An International Journal*, 9(2), 141–161. <https://doi.org/10.1615/CompMechComputApplIntJ.v9.i2.30>

9. Zahid, M., Heredia-Guerrero, J. A., Athanassiou, A., & Bayer, I. S. (2017). Robust water repellent treatment for woven cotton fabrics with eco-friendly polymers. *Chemical Engineering Journal*, 319, 321–332. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.03.006>

10. Mostovoi, A. S., Yakovlev, E. A., Burmistrov, I. N., & Panova, L. G. (2015). Use of modified nanoparticles of potassium polytitanate and physical methods of modification of epoxy compositions for improving their operational properties. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 88(1), 129–137. <https://doi.org/10.1134/S107042721501019X>

11. Szeluga, U., & Moryc, P. (2012). Curing of dicyanate ester/epoxy copolymers modified with polysiloxane and butadiene-acrylonitrile rubbers. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 109(1), 73–80. <https://doi.org/10.1007/s10973-011-1717-0>

12. Jana, S., Sui, G., & Zhong, W. H. (2009). Mechanisms for the Improvement in Interfacial Adhesion Between UHMWPE Reinforcement and Nano-epoxy Resins with Reactive Graphitic Nanofibers. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 23(9), 1281–1292. <https://doi.org/10.1163/156856109X434008>

13. Leonova, N. G., Mikhal'chuk, V. M., Mamunya, Y. P., Davydenko, V. V., & Iurzhenko, M. V. (2013). Thermophysical properties of epoxy-polysiloxane composites of cationic polymerization. *Polymer Science Series D. Glues and Sealing Materials*, 6(3), 210–217. <https://doi.org/10.1134/S1995421213030131>

14. Яцишин, О. І., Червінський, Т. І., & Братичак, М. М. (2012). Вивчення структурування епоксидної смоли ЕД-20 у присутності реакційноздатних олігомерів. *Вісник Національного Університету «Львівська Політехніка»*, 726, 467–471.

REFERENCES

1. Chen, X. (2019). Marine Transport Efficiency Evaluation of Cross-border E-commerce Logistics Based on Analytic Hierarchy Process. *Journal of Coastal Research*, 94(sp1), 682. <https://doi.org/10.2112/SI94-135.1>

2. Sui, C., Stapersma, D., Visser, K., de Vos, P., & Ding, Y. (2019). Energy effectiveness of ocean-going cargo ship under various operating conditions. *Ocean Engineering*, 190, 106473. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106473>

3. Voznickij, I. V., & Punda, A. S. (2008). *Sudovye dvigateli vnutrennego sgoraniya*. M.: Morkniga, 1, 282.

4. Kerber, M. L., Vinogradov, V. M., & Golovkin, G. S. (2014). *Polimernye kompozicionnye materialy: struktura, svojstva, tekhnologiya*. COP «Professiya».

5. Buketov, A., Brailo, M., Yakushchenko, S., & Saprionova, A. (2018). Development of Epoxy-Polyester Composite with Improved Thermophysical Properties for Restoration of Details of Sea and River Transport. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, 1–6. <https://doi.org/10.1155/2018/6378782>

6. Buketov, A. V., Brailo, M. V., Yakushchenko, S. V., Saprionov, O. O., & Smetankin, S. O. (2018). The formulation of epoxy-polyester matrix with improved physical and mechanical properties for restoration of means of sea and river transport. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 1–6. <https://doi.org/10.1080/20464177.2018.1530171>

7. Salom, C., Prolongo, M. G., Toribio, A., Martínez-Martínez, A. J., de Cárcer, I. A., & Prolongo, S. G. (2018). Mechanical properties and adhesive behavior of epoxy-graphene nanocomposites. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 84, 119–125. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2017.12.004>
8. Buketov, A. V., Sapronov, A. A., Buketova, N. N., Brailo, M. V., Marushak, P. O., Panin, S. V., & Amelin, M. Y. (2018). Impact toughness of nanocomposite materials filled with fullerene C60 particles. *Composites: Mechanics, Computations, Applications: An International Journal*, 9(2), 141–161. <https://doi.org/10.1615/CompMechComputApplIntJ.v9.i2.30>
9. Zahid, M., Heredia-Guerrero, J. A., Athanassiou, A., & Bayer, I. S. (2017). Robust water repellent treatment for woven cotton fabrics with eco-friendly polymers. *Chemical Engineering Journal*, 319, 321–332. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.03.006>
10. Mostovoi, A. S., Yakovlev, E. A., Burmistrov, I. N., & Panova, L. G. (2015). Use of modified nanoparticles of potassium polytitanate and physical methods of modification of epoxy compositions for improving their operational properties. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 88(1), 129–137. <https://doi.org/10.1134/S107042721501019X>
11. Szeluga, U., & Moryc, P. (2012). Curing of dicyanate ester/epoxy copolymers modified with polysiloxane and butadiene-acrylonitrile rubbers. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 109(1), 73–80. <https://doi.org/10.1007/s10973-011-1717-0>
12. Jana, S., Sui, G., & Zhong, W. H. (2009). Mechanisms for the Improvement in Interfacial Adhesion Between UHMWPE Reinforcement and Nano-epoxy Resins with Reactive Graphitic Nanofibers. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 23(9), 1281–1292. <https://doi.org/10.1163/156856109X434008>
13. Leonova, N. G., Mikhal'chuk, V. M., Mamunya, Y. P., Davydenko, V. V., & Iurzhenko, M. V. (2013). Thermophysical properties of epoxy-polysiloxane composites of cationic polymerization. *Polymer Science Series D. Glues and Sealing Materials*, 6(3), 210–217. <https://doi.org/10.1134/S1995421213030131>
14. Yacishin, O. I., Chervins'kij, T. I., & Bratichak, M. M. (2012). Vivchennya strukturuvannya epoksidnoї smoli ED-20 u prisutnosti reakcijnozdatnih oligomeriv. *Visnik Nacional'nogo Universitetu «L'vivs'ka Politehnika»*, 726, 467–471.

Браило Н. В., Якущенко С. В., Кобельник О. С., Соценко В. В., Букетова Н. Н., Вороненко С. В.
СОЗДАНИЕ НАНОПОЛНЕННЫХ ЭПОКСИ-ПОЛИЭФИРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЭЛЕМЕНТОВ СУДОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

В работе исследовано влияние нанонаполнителей на теплофизические свойства эпокси-полиэфирных композитов. Содержание наполнителей (окисленная нанодисперсная добавка и пирогенный диоксид кремния) меняли в пределах $q = 0,02 \dots 1,0$ масс.ч. на 100 масс.ч. эпоксидного олигомера марки ЭД-20. Доказано, что введение в эпокси-полиэфирное связующие окисленной нанодисперсной добавки в количестве $q = 0,05 \dots 0,08$ масс.ч. приводит к повышению теплофизических свойств композита. Показатель теплостойкости (по Мартенсом) при содержании окисленной нанодисперсной добавки $q = 0,075$ масс.ч. составлял $T = 346$ К. Введение $q = 0,05$ масс.ч. окисленной нанодисперсной добавки позволяет получить улучшенные показатели температурного коэффициента линейного расширения в разных температурных диапазонах: в области $\Delta T = 303 \dots 323$ К – $\alpha = 1,0 \times 10^{-5}$ К⁻¹ в области $\Delta T = 303 \dots 373$ К – $\alpha = 1,9 \times 10^{-5}$ К⁻¹ в области $\Delta T = 303 \dots 423$ К – $\alpha = 3,4 \times 10^{-5}$ К⁻¹. Констатировано, что при содержании $q = 0,05$ масс.ч. нанонаполнителя пирогенного диоксид кремния композитный материал также отличается улучшенными показателями теплостойкости (по Мартенсом), которая составляет $T = 347$ К и минимальными показателями термического коэффициента линейного расширения. Показатели температурного коэффициента линейного расширения составляют: $\alpha = 1,0 \times 10^{-5}$ К⁻¹ в области ($\Delta T = 303 \dots 323$ К), $\alpha = 1,9 \times 10^{-5}$ К⁻¹ (в области $\Delta T = 303 \dots 373$ К), $\alpha = 3,4 \times 10^{-5}$ К⁻¹ (в области $\Delta T = 303 \dots 423$ К), $\alpha = 8,4 \times 10^{-5}$ К⁻¹ (в области $\Delta T = 303 \dots 473$ К). Рекомендуются, что с целью формирования композитного материала с улучшенными теплофизическими свойствами для защиты элементов судовых технических средств целесообразно вводить в эпокси-полиэфирное связующее нанонаполнитель ПДК в количестве $q = 0,05$ масс.ч.

Ключевые слова: эпокси-полиэфирная матрица, композитный материал, нанонаполнитель, теплофизические свойства, теплостойкость (по Мартенсу), термический коэффициент линейного расширения, окисленная нанодисперсная добавка, пирогенный диоксид кремния, связующие.

Brailo M., Yakushchenko S., Kobelnik O., Sotsenko V.V., Buketova N., Voronenko S. GENERATION OF NANO-FILLED EPOXY-POLYESTER COMPOSITE MATERIALS FOR PROTECTION OF ELEMENTS OF VESSEL TECHNICAL MEANS

The influence of nanofillers on thermophysical properties of epoxy-polyester composites has been investigated in the work. The filler content (oxidized nanodisperse additive and pyrogenic silicon dioxide) has been varied within $q = 0.02 \dots 1.0$ pts.wt. per 100 pts.wt. of epoxy oligomer ED-20. It has been discovered that the introduction of the oxidized nanodisperse additive in the amount of $q = 0.05 \dots 0.08$ pts.wt. into the epoxy-polyester binder leads to an improvement in the thermophysical properties of the composite. Value of heat resistance (according to Martens) increased from $T = 335$ K (for the epoxy-polyester matrix) to $T = 346$ K at the content of oxidized nanodisperse additive of $q = 0.075$ pts.wt. Introduction of $q = 0.05$ pts.wt. of oxidized nanodisperse additive allows to obtain improved values of the temperature coefficient of linear expansion in different temperature ranges: in the region $\Delta T = 303 \dots 323$ K - $\alpha = 1.0 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, in the region $\Delta T = 303 \dots 373$ K - $\alpha = 1.9 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, in the region $\Delta T = 303 \dots 423$ K - $\alpha = 3.4 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. It has been determined that the composite material has also improved its heat resistance (according to Martens), which is $T = 347$ K and the minimum thermal coefficient of linear expansion at the content of $q = 0.05$ pts.wt. of pyrogenic silicon dioxide nanofiller. Values of the temperature coefficient of linear expansion were: $\alpha = 1.0 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ in the region ($\Delta T = 303 \dots 323$ K), $\alpha = 1.9 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ (in the region $\Delta T = 303 \dots 373$ K), $\Delta\alpha = 3.4 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ (in the region $\Delta T = 303 \dots 423$ K), $\alpha = 8.4 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ (in the region $\Delta T = 303 \dots 473$ K). It is recommended that in order to form a composite material with improved thermophysical properties to protect the elements of ship technical equipment, it is advisable to introduce the pyrogenic silicon dioxide nanofiller in the amount of $q = 0.05$ pts.wt. into the epoxy-polyester binder.

Keywords: epoxy-polyester matrix, composite material, nanofillers, thermophysical properties, heat resistance (according to Martens), thermal coefficient of linear expansion, oxidized nanodisperse additive, pyrogenic silicon dioxide, binder.

© Браїло М. В., Якущенко С. В., Кобельник О. С., Соценко В. В., Букетова Н. М., Вороненко С. В.

Статтю прийнято
до редакції 18.07.20

МОДИФІКОВАНА ЕПОКСИДНА МАТРИЦЯ ДЛЯ ЗАХИСТУ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ: АДГЕЗІЙНІ ТА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

Букетов А. В., д.т.н., завідувач кафедри транспортних технологій Херсонської державної морської академії, e-mail: buketov@tntu.edu.ua, ORCID: 0000-0001-9836-3296;

Чернявська Т. В., аспірант кафедри транспортних технологій та механічної інженерії Херсонської державної морської академії, ORCID: 0000-0003-4019-9715,

Івченко Т. І., к.т.н., доцент кафедри транспортних технологій Херсонської державної морської академії, ORCID: 0000-0001-9836-3296;

Клевцов К. М., д.т.н., професор кафедри транспортних технологій Херсонської державної морської академії, ORCID: 0000-0001-9836-3296;

Фесенко І. П., д.т.н., професор Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України (м. Київ), ORCID: 0000-0001-9836-3296;

Яцюк В. М., співробітник Тернопільського науково-дослідного експертно-криміналістичного центру МВС України

Показано, що полімерні композитні матеріали мають важливе значення в сучасній техніці, позаяк характеризуються високими показниками експлуатаційних параметрів, у тому числі поліпшеною адгезійною міцністю, покращеними механічними і теплофізичними властивостями, що забезпечує можливість їх використання за звичайних та підвищених температур. Як основний компонент для зв'язувача при формуванні епоксидних матеріалів вибрано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20. Для зшивання епоксидних композицій використано твердник поліетиленполіамін. Як модифікатор використано фталімід. Молекулярна формула модифікатора: $C_8H_5NO_2$. Молярна маса фталіміду – 147,13 г/моль. Густина – 1,47 г/см³. Модифікатор розчинний у воді та полярних органічних розчинниках.

Доведено, що при введенні модифікатора фталіміду у кількості $q = 2,0$ мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20 формується матеріал з наступними властивостями: адгезійна міцність при відриві – $\sigma_a = 47,7$ МПа, залишкові напруження – $\sigma_z = 1,1$ МПа. Це забезпечує підвищення, порівняно з вихідною епоксидною матрицею, показників адгезійної міцності при відриві у 1,9 разів, а залишкові напруження при цьому зменшуються у 1,3 рази. Отриманий композит доцільно використовувати у вигляді матриці при формуванні адгезійного шару для захисних покриттів. Експериментально доведено, що для формування матеріалів з поліпшеними когезійними властивостями необхідно використовувати композицію наступного складу: епоксидний олігомер марки ЕД-20 ($q = 100$ мас.ч.), твердник поліетиленполіамін ПЕПА ($q = 10$ мас.ч.), модифікатор фталімід ($q = 0,25$ мас.ч.). Формування такого матеріалу забезпечує порівняно з вихідною епоксидною матрицею підвищення наступних показників фізико-механічних властивостей композитів: руйнівних напружень при згинанні – від $\sigma_{z2} = 48,0$ МПа до $\sigma_{z2} = 62,1$ МПа; ударної в'язкості – від $W = 7,4$ кДж/м² до $W = 14,7$ кДж/м². Зазначимо, що модуль пружності такого матеріалу зменшується порівняно з вихідною епоксидною матрицею від $E = 2,8$ ГПа до $E = 2,2$ ГПа. Отриманий композит доцільно використовувати у вигляді матриці при формуванні поверхневого шару для захисних покриттів.

Ключові слова: матриця, епоксидний композит, модифікатор, адгезійні властивості, когезійна міцність, залишкові напруження.

DOI: 10.33815/2313-4763.2020.1.22.153-166

Постановка проблеми. Полімерні композитні матеріали (КМ) мають важливе значення в сучасній техніці, позаяк характеризуються високими показниками експлуатаційних параметрів, у тому числі поліпшеною адгезійною міцністю, покращеними механічними і теплофізичними властивостями, що забезпечує можливість їх використання за звичайних та підвищених температур [1–5]. При створенні полімерних КМ з наперед заданими властивостями у олігомерний зв'язувач вводять модифікатори, пластифікатори і наповнювачі. Тому важливим є не лише вибір технологічних методів формування композитів і покриттів на їх основі, які охоплюють етапи змішування, фізичного модифікування і термічного зшивання. Суттєву увагу приділяють вибору природи добавок;

дослідженню їх критичного вмісту у полімері, що дозволить отримати синергетичний ефект у підвищенні показників необхідних властивостей композитів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Авторами [6–13] доведено, що для покращення адгезійних і фізико-механічних властивостей полімерних композитів у епоксидний зв'язувач доцільно вводити модифікатори. При цьому показано доцільність введення у епоксидний олігомер при створенні матеріалів з наперед заданими властивостями модифікаторів за незначного вмісту, таких як: 2,4-діаміноазобензол-4'-карбонової кислота, 4,4'-метиленбіс(2-метоксианілін), парааміноазобензол, бензен-1,3-діамін та ін. Зазначимо, що введення таких добавок за гомеопатичного вмісту забезпечує поліпшення адгезійних, механічних чи теплофізичних властивостей матеріалів. При цьому важливим є покращення зазначених властивостей матеріалів у комплексі, що диктується вимогами часу. Тому цікавим є використання при створенні полімерних КМ такої добавки як фталімід, яка відрізняється властивостями, характерними для імідів дикарбонових кислот. Такий модифікатор містить азотні і карбонільні групи, які, на наш погляд, можуть взаємодіяти з гідроксильними групами епоксидного олігомеру, що дозволить підвищити показники адгезійних і механічних властивостей нових епоксикомпозитних матеріалів у комплексі.

Мета роботи – дослідити вплив модифікатора фталіміду на адгезійні і фізико-механічні властивості епоксикомпозитних матеріалів і захисних покриттів на їх основі.

Матеріали та методика дослідження. Як основний компонент для зв'язувача при формуванні епоксидних КМ вибрано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84), який характеризується високою адгезійною та когезійною міцністю, незначною усадкою і технологічністю при нанесенні на поверхні складного профілю. Для зшивання епоксидних композицій використано твердник поліетиленполіамін ПЕПА (ТУ 6-05-241-202-78), що дозволяє затверджувати матеріали при кімнатних температурах. Відомо, що ПЕПА є низькомолекулярною речовиною, яка складається з таких взаємозв'язаних компонентів: $[-CH_2-CH_2-NH-]_n$. Характеристики епоксидного діанового олігомеру і твердника наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Характеристики компонентів епоксидного зв'язувача

Характеристики	Епоксидний олігомер ЕД-20	Твердник ПЕПА
Молекулярна маса	390...430	230...250
Вміст епоксидних груп, %	20,0...22,5	–
Вміст гідроксильних груп, %	1,25	–
Середня функціональність за епоксидними групами, f_n	2,0	–
Вміст азоту, %	–	19,5...22,0
Вміст вуглецю, %	–	–
Вміст кисню, %	–	–
Вміст водню, %	–	–
В'язкість, η , Па·с	13...20	0,9
Густина, ρ , г/см ³	1,16	1,05

Як модифікатор використано фталімід (інші назви: імід о-фталевої кислоти або ізоіндолін-1,3-діон). Модифікатор вводили у зв'язувач за вмісту від 0,10 до 2,00 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20 (тут і далі за текстом мас. ч. наводять на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20). Молекулярна формула модифікатора: $C_8H_5NO_2$. Молярна маса фталіміду – 147,13 г/моль. Густина – 1,47 г/см³. Термічні властивості: температура плавлення – 238 °С, температура кипіння – 336 °С. Молекулярна теплоємність – 1,21 Дж/(моль·К). Ентальпія утворення – -3560 кДж/моль. Фталімід відрізняється властивостями, характерними для дикарбонових кислот: легко гідролізується при дії 25%-ного водного розчину NaOH з утворенням фталамінової кислоти, при алкінуванні спиртами утворюються N-алкілзаміщені кислоти, амоніліз приводить до утворення діаміду фталевої

кислоти. Модифікатор розчинний у воді та полярних органічних розчинниках. Структурну формулу і загальний вигляд модифікатора наведено на рис. 1 та рис. 2.

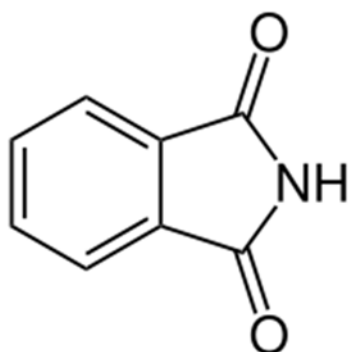


Рисунок 1 – Загальний вигляд хімічних зв'язків модифікатора фталіміду



Рисунок 2 – Загальний вигляд модифікатора фталіміду

Крім того, фталімід – слабка кислота, при взаємодії з лугами утворює водорозчинні N-металеві похідні, з яких практичне значення має калієва сіль фталіміду, яку використовують для отримання первинних амінів та амінокислот. З галогенами фталімід утворює N-галогензаміщені кислоти. Обробка фталіміду гіпохлоридом Na у лужному розчині при 80 °С забезпечує отримання антранілової кислоти (рис. 3):

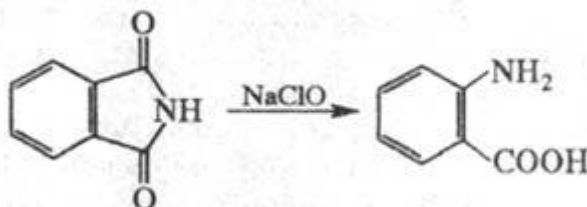


Рисунок 3 – Схема отримання антранілової кислоти з фталіміду [14]

При дії Sn у розчині HCl фталімід відновлюється до фталімідину (I); при дії Zn у лужному середовищі – до фталіду (II); при дії Li в ефірі при 25 °С він перетворюється в ізоіндол (III) (рис. 4).

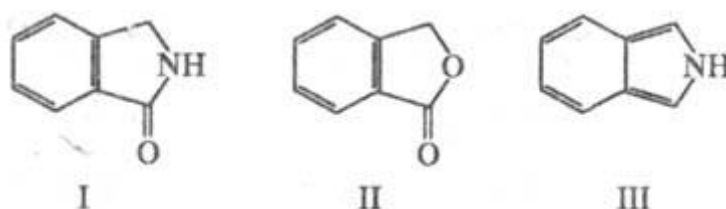


Рисунок 4 – Схеми отримання фталімідину (I), фталіду (II) і ізоіндолу (III) з фталіміду [14]

У промисловості фталімід отримують шляхом взаємодії фталевого ангідриду з NH_3 . Процес здійснюють у вертикальному трубчастому реакторі, нижній кінець якого герметично пов'язаний із сублимаційною камерою, а зверху в реактор безперервно подають розплавлений фталевий ангідрид із залишком NH_3 , а далі нагрівають до $250 \dots 280 \text{ }^\circ\text{C}$. На завершальному етапі реакційну суміш охолоджують в сублимаційній камері до $170 \dots 180 \text{ }^\circ\text{C}$, відділяють твердий фталімід (вихід 98 %, чистота продукту 99 %).

Епоксидні композити і покриття на їх основі формували за такою технологією: підігрівання смоли до температури $T = 353 \pm 2 \text{ K}$ і витримка при даній температурі впродовж часу $\tau = 20 \pm 0,1 \text{ хв}$; гідродинамічне суміщення олігомеру і модифікатора впродовж часу $\tau = 1 \pm 0,1 \text{ хв}$; ультразвукова обробка (УЗО) композиції впродовж часу $\tau = 1,5 \pm 0,1 \text{ хв}$; охолодження композиції до кімнатної температури впродовж часу $\tau = 60 \pm 5 \text{ хв}$; введення твердника і суміщення компонентів композиції впродовж часу $\tau = 5 \pm 0,1 \text{ хв}$. Затверджували КМ за режимом: формування зразків та їх витримання впродовж часу $\tau = 12,0 \pm 0,1 \text{ год}$ за температури $T = 293 \pm 2 \text{ K}$, нагрівання зі швидкістю $v = 3 \text{ K/хв}$ до температури $T = 393 \pm 2 \text{ K}$, витримання впродовж часу $\tau = 2,0 \pm 0,05 \text{ год}$, повільне охолодження до температури $T = 293 \pm 2 \text{ K}$. З метою стабілізації структурних процесів у матриці зразки витримували впродовж часу $\tau = 24 \text{ год}$ на повітрі за температури $T = 293 \pm 2 \text{ K}$ з наступним проведенням експериментальних випробувань.

Адгезійну міцність матриці до металевої основи досліджували, вимірюючи руйнівні напруження («метод грибків») при рівномірному відриві пари склеєних зразків згідно ГОСТ 14760 - 69. Дослідження адгезійної міцності при відриві проводили, вимірюючи силу відривання клейових з'єднань зразків на автоматизованій розривній машині УМ-5 при швидкості навантаження $v = 10 \text{ м/с}$. Діаметр робочої частини зразків становив – $d = 25 \text{ мм}$.

Залишкові напруження у матриці визначали консольним методом [15]. Покриття товщиною $\delta = 0,3 \dots 0,8 \text{ мм}$ формували на металевій основі. Параметри основи: загальна довжина – $l = 100 \text{ мм}$, робоча довжина – $l_0 = 80 \text{ мм}$, товщина – $\delta = 0,3 \text{ мм}$. Відхилення значень при дослідженнях показників адгезійних властивостей і залишкових напружень у КМ становило 4...6 % від номінального.

Руйнівні напруження і модуль пружності при згинанні визначали згідно з ГОСТ 4648-71 і ГОСТ 9550-81 відповідно. Параметри зразків: довжина $l = 120 \pm 2 \text{ мм}$, ширина $b = 15 \pm 0,5 \text{ мм}$, висота $h = 10 \pm 0,5 \text{ мм}$.

Ударну в'язкість визначали за методом Шарпі відповідно до ГОСТ 4647-80 на маятниковому копрі МК-30 при температурі $T = 298 \pm 2 \text{ K}$ і відносній вологості $d = 50 \pm 5 \%$. Використовували зразки з такими параметрами: $(63,5 \times 12,7 \times 12,7) \pm 0,5 \text{ мм}$. Відстань між опорами $40 \pm 0,5 \text{ мм}$.

Відхилення значень при дослідженнях показників фізико-механічних властивостей КМ становило 4...6 % від номінального.

Результати досліджень та їх обговорення. На початковому етапі методом газової хроматографії мас-селективним детектуванням проводили дослідження з метою визначення молекулярної маси синтезованого модифікатора.

При цьому речовину масою 0,0124 г розчиняли в метанолі та проводили хроматографування за наступних умов [9]:

- прилад – GC/MS Agilent Technologies 6890 N;
- капілярна колонка – HP 19091S-433 (HP-5MS);
- довжина – 30 мм, діаметр – 0,25 мм, фаза – 0,25мкм;

- газ-носії – гелій;
- постійний потік газу-носія – 1,5 мл/хв;
- інжектор – автоінжектор 7683, Split 20:1;
- температура випаровувача – $T = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$; технологічні режими нагрівання:
 $T_{\text{поч}} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, утримання – 2 хв, швидкість нагрівання – $15\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{хв}$, $T_{\text{кін}} = 280\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- детектор – масс-селективний, температура інтерфейсу $T = 280\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- іонізація – електронним ударом, енергія іонізації – 70 eV;
- температура іонного джерела – $T = 230\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- температура квадруполя – $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- проба – 1,0 мкл.

Експериментальні результати випробувнь наведено на рис. 5. На попередньому етапі проводили хроматографування проб модифікатора і знаходили значення сигналів від часу їх утримання. На наступному етапі аналізували параметри сигналів. У результаті отримано сигнал при часі утримання $t = 0,976\text{ хв}$ (рис. 5).

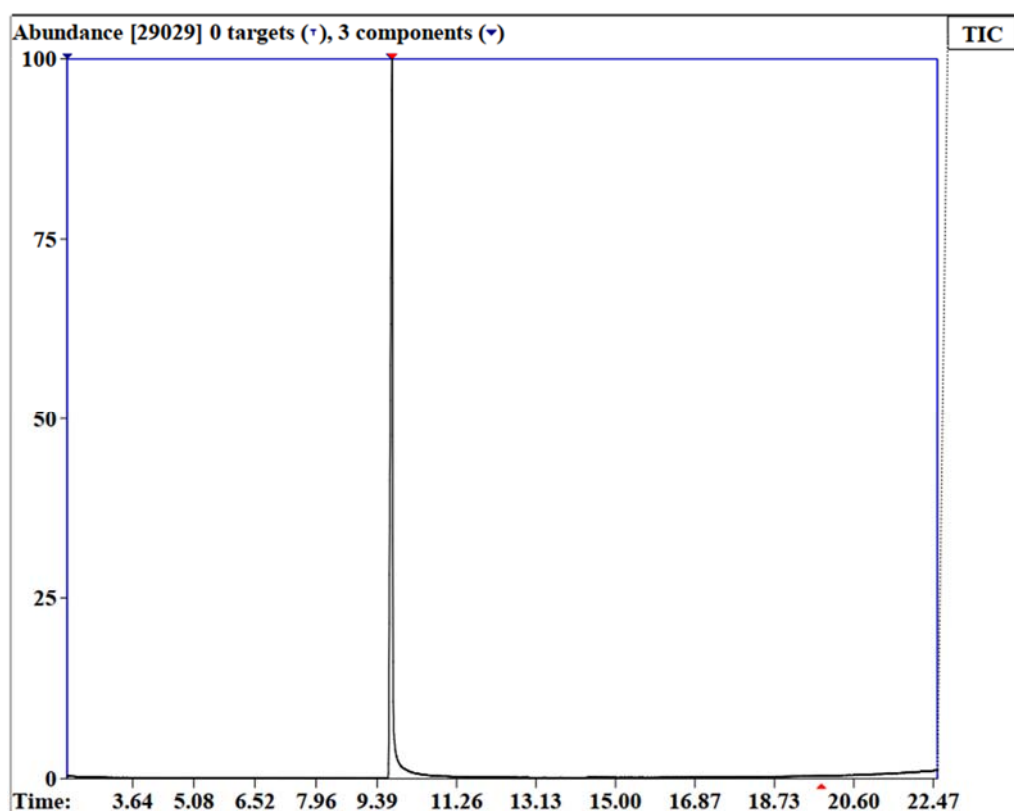
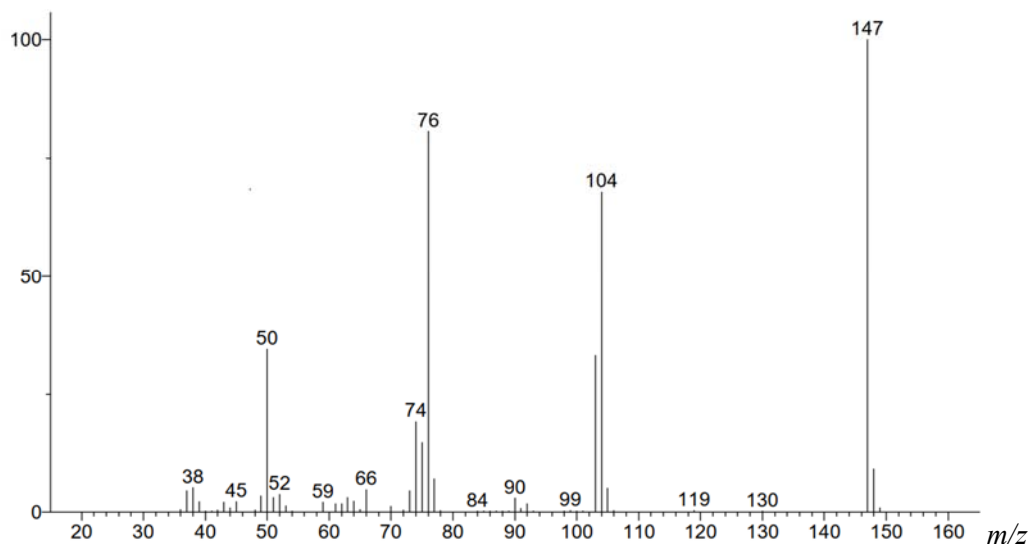


Рисунок 5 – Значення сигналу від часу утримання проби модифікатора

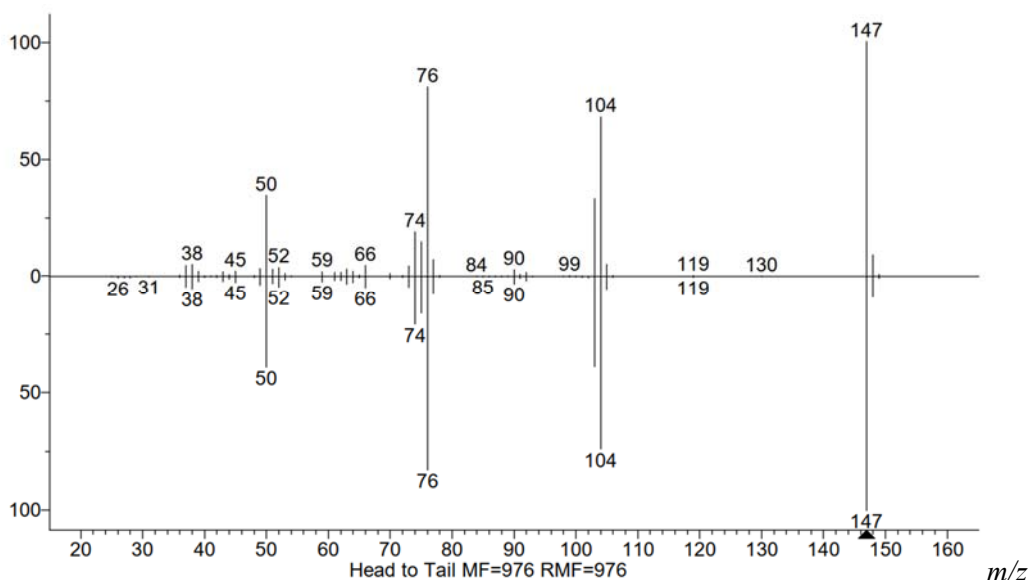
Надалі для визначеного часу утримання сигналу $RT = 0,976\text{ мAU}$, який характеризує лише досліджувану речовину – синтезований модифікатор, знаходили залежність значення характеристичних сигналів від m/z (m – маса проби; z – заряд) (рис. 6). У результаті знаходили значення характеристичних сигналів, виявлено 10 найбільших піків при $m/z = 50,3; 74,2; 75,1; 76,8; 77,7; 103,3; 104,7; 105,5; 147,9; 148,8$. Отримані значення співставляли з табличними даними, внаслідок чого отримали структурну формулу і величину молекулярної маси синтезованого модифікатора. Доведено, що формула модифікатора має наступний вигляд: $\text{C}_8\text{H}_5\text{NO}_2$. Молекулярна маса фталіміду становить 147,032028. Молекулярна маса фталіміду майже співпадає з аналогічною масою твердника і несуттєво відрізняється від молекулярної маси епоксидного олігомера. На наш погляд, це є важливим аспектом направленою регулювання процесів структуроутворення полімерних компаундів.

Значення характ. сигн.,

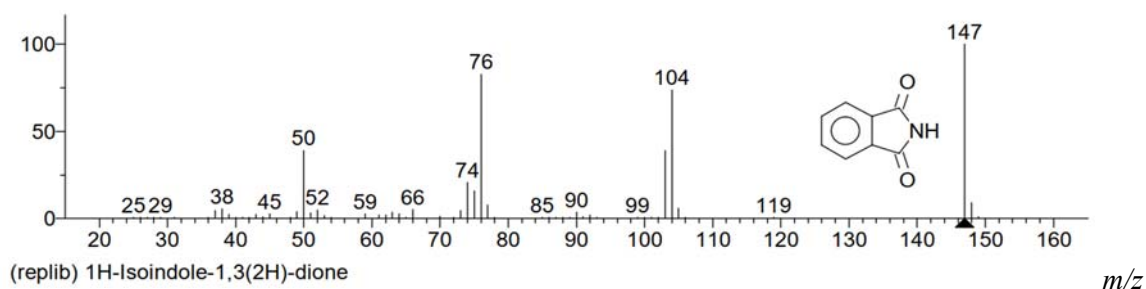
mAU



а) Значення характ. сигн., mAU



б) Значення характ. сигн., mAU



в)

Рисунок 6 – Залежність значення характеристичних сигналів від m/z при часі утримання сигналу $RT = 0,976$ mAU; m – маса пробі; z – заряд

а) значення характеристичних сигналів; б) значення характеристичних сигналів у розгорнутих координатах; в) структура молекули модифікатора згідно значення характеристичних сигналів і бібліотечних даних

Такі структурні характеристики і наявність активних груп у модифікаторі дозволить підвищити ступінь зшивання епоксикомпозитів, що очевидно дозволить підвищити показники їх адгезійних і когезійних властивостей.

На наступному етапі досліджували властивості вихідної епоксидної матриці. Показано (рис. 7), що адгезійна міцність вихідної епоксидної матриці, сформованої за схемою полімеризації, яка описана у п. «Методика дослідження», становить $\sigma_a = 24,8$ МПа. Введення у зв'язувач модифікатора приводить до суттєвого підвищення показників адгезійної міцності при відриві епоксидної матриці. Зокрема, показано (рис. 7, крива 1), що введення добавки за незначного вмісту ($q = 0,25 \dots 0,50$ мас.ч.) забезпечує підвищення показників адгезійної міцності матриці від $\sigma_a = 24,8$ МПа до $\sigma_a = 32,2 \dots 38,2$ МПа. Покращення властивостей модифікованої матриці порівняно з вихідною зумовлено наявністю у добавки амідних (C(=O)NH-) груп, які у свою чергу характеризуються наявністю карбонільних (C=O) і азотовмісних (NH-) груп.

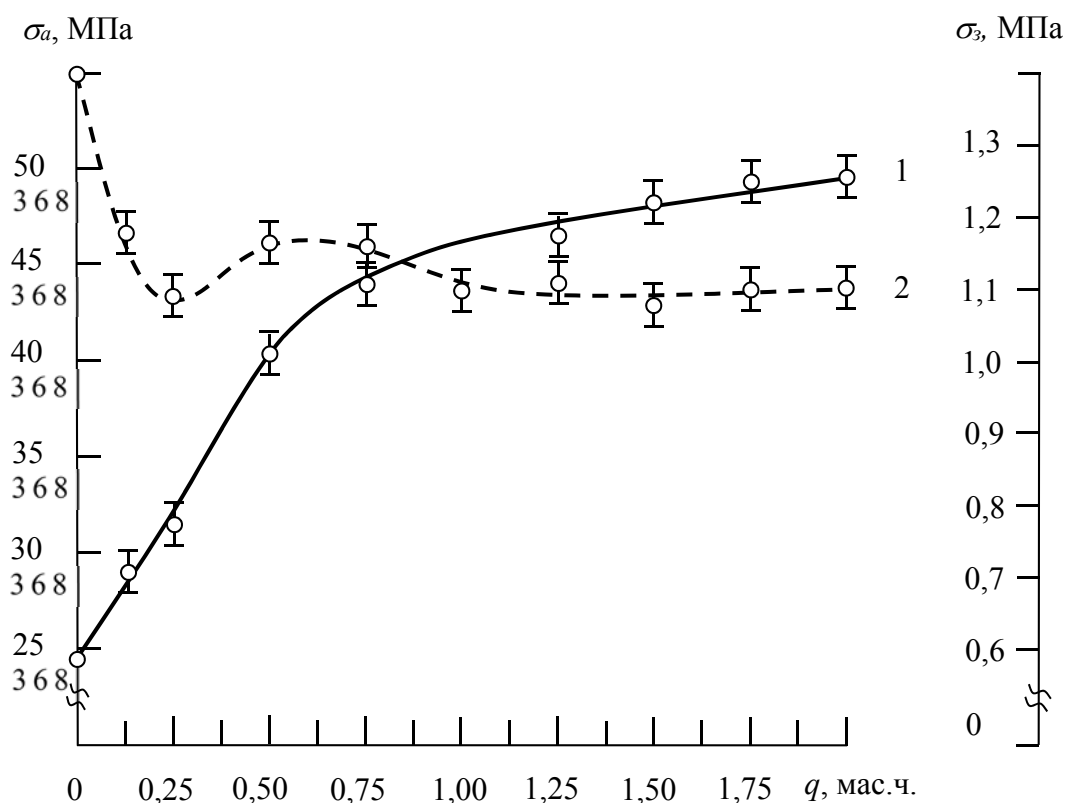


Рисунок 7 – Залежність адгезійної міцності і залишкових напружень у КМ від вмісту модифікатора фталіміду: 1 – адгезійна міцність при відриві (σ_a); 2 – залишкові напруження (σ_3). Матеріал основи – сталь марки Ст 3

Саме такі бокові групи взаємодіють з гідроксильними, епоксидними, карбонільними і карбоксильними групами епоксидного олігомеру, завдяки наявності амінного твердника ПЕПА, що дозволяє суттєво підвищити адгезійні характеристики епоксидної матриці навіть за наявності модифікатора за гомеопатичного вмісту.

Надалі збільшення вмісту модифікатора забезпечує монотонне зростання показників адгезійної міцності матеріалів, а максимум на кривій залежності «адгезійна міцність – вміст модифікатора» спостерігали за концентрації добавки у кількості $q = 2,00$ мас.ч. Такий матеріал відзначається наступними показниками адгезійної міцності при відриві – $\sigma_a = 47,7$ МПа. Експериментально встановлено, що надалі збільшувати вміст добавки не є доцільним, оскільки показники адгезійної міцності модифікованої матриці практично не змінюються. Однією з важливих властивостей композитів і захисних покриттів на їх основі є залишкові напруження. Саме вони визначають довговічність матеріалів за різних умов їх

експлуатації. Тому у контексті дослідження адгезійної міцності модифікованих матриць додатково проводили випробування залишкових напружень у розроблених покриттях. Експериментально встановлено (рис. 7), що залишкові напруження у вихідній епоксидній матриці становлять $\sigma_3 = 1,4$ МПа. Введення добавки незалежно від концентрації забезпечує зниження залишкових напружень від $\sigma_3 = 1,4$ МПа до $\sigma_3 = 1,1 \dots 1,2$ МПа, що є позитивним з практичної точки зору. Можна констатувати, що модифікатор забезпечує не лише підвищення адгезійної міцності матеріалів, алей й сприяє додатковому зниженню залишкових напружень. Тобто, такі матеріали відзначаються поліпшеними властивостями у комплексі, порівняно з вихідною епоксидною матрицею.

Авторами [6–10] показано, що актуальним на сьогодні є формування епоксидних матриць, які відрізняються поліпшеними не лише адгезійними, але й когезійними властивостями. Тому, вважали за доцільне провести додаткові дослідження з метою аналізу когезійних властивостей модифікованих матриць залежно від вмісту активної добавки. Когезійні властивості матеріалів аналізували за трьома критеріями: модуль пружності при згинанні (E), руйнівні напруження при згинанні (σ_{3z}) і ударна в'язкість (W). Експериментально встановлено (рис. 8), що модуль пружності для епоксидної матриці становить $E = 2,8$ ГПа.

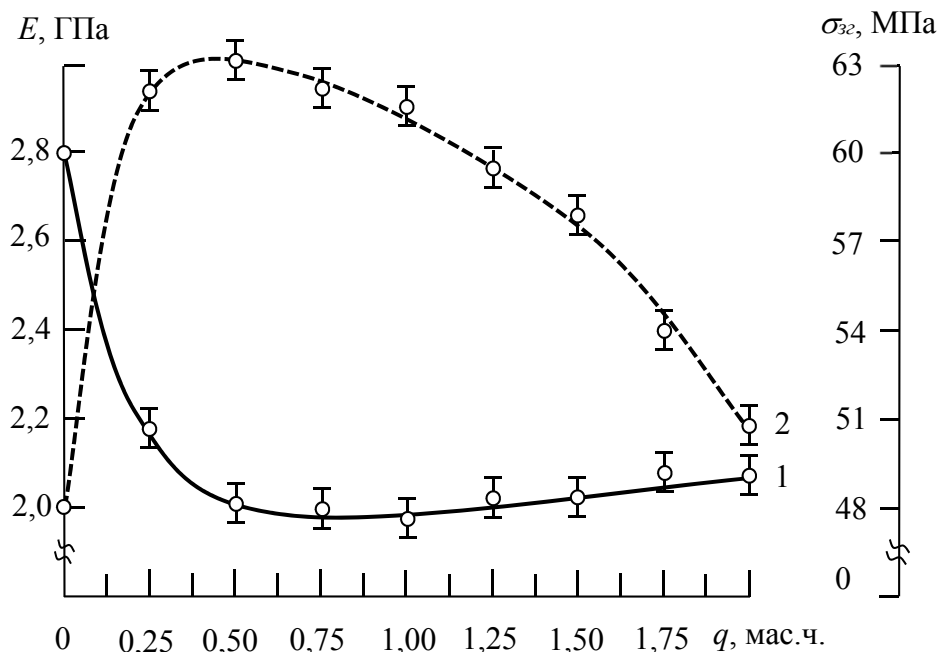


Рисунок 8 – Залежність фізико-механічних властивостей епоксидної матриці від вмісту модифікатора фталіміду: 1) модуль пружності при згинанні (E); 2) руйнівні напруження при згинанні (σ_{3z})

Введення модифікатора незалежно від кількості призводить до зменшення даного показника до $E = 2,0 \dots 2,2$ ГПа. Можна стверджувати, що модифіковані матеріали, порівняно з вихідною матрицею, відрізняються більшою пластичністю (а, отже, меншою пружністю), хоча слід констатувати про зменшення жорсткості розроблених композитів.

Додатково встановлено (рис. 8), що руйнівні напруження для вихідної епоксидної матриці становлять $\sigma_{3z} = 48,0$ МПа. Введення модифікатора у зв'язувач за незначного вмісту ($q = 0,25 \dots 0,50$ мас.ч.) забезпечує суттєве підвищення показників руйнівних напружень при згинанні від $\sigma_{3z} = 48,0$ МПа до $\sigma_{3z} = 62,1 \dots 62,8$ МПа. Остання концентрація модифікатора є критичною, оскільки подальше збільшення вмісту добавки призводить до зменшення досліджуваної характеристики епоксидної матриці.

Цікавим з наукової і практичної точки зору є аналіз поведінки матеріалів не лише за статичних, але й ударних навантажень. Тому вважали за необхідне додатково дослідити

ударну в'язкість розроблених композитів. Попередньо експериментально доведено (рис. 9), що показники ударної в'язкості вихідної епоксидної матриці становлять $W = 7,4$ кДж/м².

Введення модифікатора за незначного вмісту ($q = 0,25$ мас.ч.) забезпечує підвищення міцності матриці при ударі у 2 рази (до $W = 14,7$ кДж/м²). Надалі збільшення вмісту фталіміду у епоксидній матриці призводить до монотонного погіршення міцності матеріалів при ударі. При цьому матриця із модифікатором у кількості $q = 2,00$ мас.ч. відзначається показниками міцності при ударі, які є меншими від вихідного матеріалу (ударна в'язкість такого КМ становить $W = 5,5$ кДж/м²). Можна констатувати, що оптимальним є введення модифікатора у епоксидний зв'язувач за вмісту $q = 0,25$ мас.ч. Така модифікація забезпечує отримання матеріалу з максимальними, серед вибраного діапазону досліджуваних концентрацій, показниками руйнівних напружень при згинанні і ударною в'язкістю. При цьому модуль пружності такого матеріалу порівняно з вихідною епоксидною матрицею є дещо меншим.

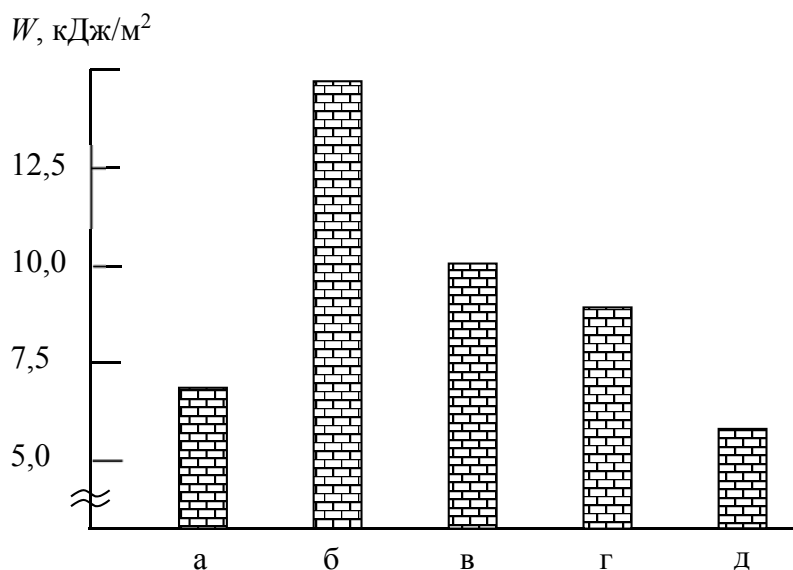


Рисунок 9 – Залежність ударної в'язкості (W) від вмісту (q) модифікатора фталіміду у матриці: а) вихідна матриця (контрольний зразок); б) $q = 0,25$ мас.ч.; в) $q = 0,50$ мас.ч.; г) $q = 1,00$ мас.ч.; д) $q = 2,00$ мас.ч.

Висновки. У роботі встановлено оптимальний вміст модифікатора фталіміду для формування модифікованої епоксидної матриці з покращеними адгезійними і когезійними властивостями. При цьому слід констатувати наступне.

1. Доведено, що при введенні модифікатора фталіміду у кількості $q = 2,0$ мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20 формується матеріал з наступними властивостями: адгезійна міцність при відриві – $\sigma_a = 47,7$ МПа, залишкові напруження – $\sigma_z = 1,1$ МПа. Це забезпечує підвищення, порівняно з вихідною епоксидною матрицею, показників адгезійної міцності при відриві у 1,9 разів, а залишкові напруження при цьому зменшуються у 1,3 рази. Отриманий композит доцільно використовувати у вигляді матриці при формуванні адгезійного шару для захисних покриттів.

2. Експериментально доведено, що для формування матеріалів з поліпшеними когезійними властивостями необхідно використовувати композицію наступного складу: епоксидний олігомер марки ЕД-20 ($q = 100$ мас.ч.), твердник поліетиленполіамін ПЕПА ($q = 10$ мас.ч.), модифікатор фталімід ($q = 0,25$ мас.ч.). Формування такого матеріалу забезпечує порівняно з вихідною епоксидною матрицею підвищення наступних показників фізико-механічних властивостей композитів:

- руйнівних напружень при згинанні – від $\sigma_{z2} = 48,0$ МПа до $\sigma_{z2} = 62,1$ МПа;
- ударної в'язкості – від $W = 7,4$ кДж/м² до $W = 14,7$ кДж/м².

Зазначимо, що модуль пружності такого матеріалу зменшується порівняно з вихідною епоксидною матрицею від $E = 2,8$ ГПа до $E = 2,2$ ГПа. Отриманий композит доцільно використовувати у вигляді матриці при формуванні поверхневого шару для захисних покриттів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Motamedi, M. Attar, M. Rostami. Performance enhancement of the oxidized bitumen binder using epoxy resin. *Progress in Organic Coatings*. 2017. V. 102. P. 178–185.
2. Асланов Т.А. Эпоксидные олигомеры и термостойкие покрытия на их основе / Т.А.Асланов, И.М.Мемедли, И.Я. Ищенко [и др.] // Пластические массы. - 2005. - № 6. - С. 25-27.
3. Ayatollahi M.R. Tribological and mechanical properties of low content nanodiamond / M.Ayatollahi, E.Alishahi, S.Doagou-R, S.Shadlou // Epoxy nanocomposites. Composites, Part B: Engineering. - 2012. - V. 43, N 8. - P. 3425-3430.
4. Jana S. Mechanisms for the Improvement in Interfacial Adhesion Between UHMWPE Reinforcement and Nano-epoxy Resins with Reactive Graphitic Nanofibers / S.Jana, G.Sui, W.Zhong // Journal of Adhesion Science and Tehnology. - 2009. - V.23, N 9. - P. 1281-1292.
5. Михайлин Ю.А. Специальные полимерные композиционные материалы / Ю.А.Михайлин. – С-Пб.: Научные основы и технологии, 2009. – 660 с.
6. Букетов А.В. Дослідження впливу синтезованої високовольтним електророзрядом порошкової шихти на теплофізичні властивості епоксидних композитів для ремонту суден / А.В. Букетов, О.М. Сизоненко, О.М. Безбах, Н.М. Букетова, Є.В. Липян // Науковий вісник ХДМА. – 2019. – № 2 (21). – С. 142-153.
7. Букетов А.В. Дослідження теплофізичних властивостей епоксикомпозитів, наповнених синтезованою порошковою титано-алюмінієвою шихтою / А.В.Букетов, О.М.Сизоненко, Р.Ю.Негруца, Є.В.Липян, А.С.Торпаков, Н.М. Букетова // Вісник ХНТУ. – 2019. - № 3 (70). – С. 22-29.
8. Букетов А.В. Дослідження теплофізичних властивостей модифікованих 4,4'-метиленбіс (2-метоксианіліном) епоксидних композитів для транспортної галузі / А.В.Букетов, О.М.Безбах, Д.Г.Круглий, Н.М.Букетова, В.М.Яцюк // Наукові нотатки. - Луцьк: ЛНТУ. Вип. 66. – 2019.– С. 23-29.
9. Букетов А.В. Розроблення епокси-поліефірної матриці з поліпшеними фізико-механічними властивостями для відновлення засобів транспорту / А.В.Букетов, М.В.Брайло, О.С.Кобельник, С.В.Якущенко, А.В.Сапронова // Наукові нотатки. - Луцьк: ЛНТУ. Вип. 66. – 2019.– С. 30-36.
10. Букетов А.В. Вплив модифікаторів C13H12CL2N2TA C13H14N2 на механічні властивості епоксидної матриці / А.В.Букетов, В.Г.Кулініч, С.А.Сметанкін, Н.М.Букетова, В.М.Яцюк // Наукові нотатки. - Луцьк: ЛНТУ. Вип. 66. – 2019.– С. 37-45.
11. Стухляк П.Д., Букетов А.В., Редько О.І. Епоксидно-діанові композити: технологія формування, фізико-механічні і теплофізичні властивості: монографія. – Тернопіль: Крок, 2011. – 165 с.
12. Букетов А.В., Стухляк П.Д., Левицький В.В., Долгов М.А. Дослідження епоксикомпозитів, що містять модифіковані олігомерами наповнювачі // Вісник ТДТУ.- 2004.-№2.-С.52-59.
13. Букетов А.В., Стухляк П.Д., Долгов М.А. Дослідження поведінки епоксикомпозитних покриттів в умовах напружено-деформованого стану після їх УФ-опромінення і магнітної обробки // Вісник ТДТУ.-2004.-№4.-С.36-45.
14.
<https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%BC%D0%B8%D0%B4>
15. Корякина М.И. Испытание лакокрасочных материалов и покрытий / М.И.Корякина. - М.: Химия, 1988. - 272 с.

REFERENCES

1. Motamedi M. Performance enhancement of the oxidized bitumen binder using epoxy resin / M.Motamedi, M.Attar, M.Rostami // Progress in Organic Coatings. - 2017. - V. 102. - P. 178-185.
2. Aslanov T.A. Эпоксидные олигомеры и термостойкие покрытия на их основе / T.A.Aslanov, Y.M.Memedly, Y.Ya. Y'shenko [y' dr.] // Plastycheskye massy. - 2005. - # 6. - S. 25-27.
3. Ayatollahi M.R. Tribological and mechanical properties of low content nanodiamond / M.Ayatollahi, E.Alishahi, S.Doagou-R, S.Shadlou // Epoxy nanocomposites. Composites, Part B: Engineering. - 2012. - V. 43, N 8. - P. 3425-3430.
4. Jana S. Mechanisms for the Improvement in Interfacial Adhesion Between UHMWPE Reinforcement and Nano-epoxy Resins with Reactive Graphitic Nanofibers / S.Jana, G.Sui, W.Zhong // Journal of Adhesion Science and Tehnology. - 2009. - V.23, N 9. - P. 1281-1292.
5. My'hajly'n Yu.A. Spetsyal'nye polimerные kompozytsionnye mater'aly / Yu.A.My'hajly'n. - S-Pb.: Nauchnye osnovy y' technology'y, 2009. - 660 s.
6. Buketov A.V. Doslidzhennya vplyvu syntezovanoj vy'sokovol'ny'm elektrorozryadom poroshkovoj shy'xty' na teplofizychni vlasty'vosti epoksydny'x kompozytiv dlya remontu suden / A.V. Buketov, O.M. Sy'zonenko, O.M. Bezbax, N.M. Buketova, Ye.V. Ly'pyan // Naukovy'j visnyk XDMA. - 2019. - # 2 (21). - S. 142-153.
7. Buketov A.V. Doslidzhennya teplofizychny'x vlasty'vostej epoksykompozytiv, napovneny'x syntezovanoju poroshkovuju ty'tano-alyuminiyevuju shy'xtoju / A.V.Buketov, O.M.Sy'zonenko, R.Yu.Negrucza, Ye.V.Ly'pyan, A.S.Torpakov, N.M. Buketova // Visnyk XNTU. - 2019. - # 3 (70). - S. 22-29.
8. Buketov A.V. Doslidzhennya teplofizychny'x vlasty'vostej modyfikovany'x 4,4'-metylenbis (2-metoksy'anilinom) epoksydny'x kompozytiv dlya transportnoj galuzi / A.V.Buketov, O.M.Bezbax, D.G.Krugly'j, N.M.Buketova, V.M.Yacyuk // Naukovi notatky'. - Lucz'k: LNTU. Vy'p. 66. - 2019.- S. 23-29.
9. Buketov A.V. Rozroblennya epoksy-poliefirnoj matryci z polipsheny'my' fizyko-mexanichny'my' vlasty'vostyamy' dlya vidnovlennya zasobiv transportu / A.V.Buketov, M.V.Brayilo, O.S.Kobel'ny'k, S.V.Yakushhenko, A.V.Sapronova // Naukovi notatky'. - Lucz'k: LNTU. Vy'p. 66. - 2019.- S. 30-36.
10. Buketov A.V. Vplyv modyfikativ C13H12CL2N2TA C13H14N2 na mexanichni vlasty'vosti epoksydnoj matryci / A.V.Buketov, V.G.Kulinich, S.A.Smetankin, N.M.Buketova, V.M.Yacyuk // Naukovi notatky'. - Lucz'k: LNTU. Vy'p. 66. - 2019.- S. 37-45.
11. Stuxlyak P.D., Buketov A.V., Red'ko O.I. Epoksydno-dianovi kompozyty: texnologiya formuvannya, fizyko-mexanichni i teplofizychni vlasty'vosti: monografiya. - Ternopil': Krok, 2011. - 165 s.
12. Buketov A.V., Stuxlyak P.D., Levy'cz'ky'j V.V., Dolgov M.A. Doslidzhennya epoksykompozytiv, shho mistyat' modyfikovani oligomeramy' napovnyuvachi // Visnyk TDTU.-2004.-#2.-S.52-59.
13. Buketov A.V., Stuxlyak P.D., Dolgov M.A. Doslidzhennya povedinky' epoksykompozytny'x pokryttiv v umovax napruzhenodeformovanogo stanu pislya yix UF-oprominennya i magnitnoj obrobky' // Visnyk TDTU.-2004.-#4.-S.36-45.
14. <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%BC%D0%B8%D0%B4>
15. Koryaky'na M.Y'. Y'sprytany'e lakokrasochny'x mater'alov y' pokryty'j / M.Y'.Koryaky'na. - M.: Xu'my'ya, 1988. - 272 s.

Букетов А. В., Чернявская Т. В., Ивченко Т. И., Клевцов К. Н., Фесенко И. П., Яцюк В. Н.
МОДИФИЦИРОВАННАЯ ЭПОКСИДНАЯ МАТРИЦА ДЛЯ ЗАЩИТЫ СРЕДСТВ ТРАНСПОРТА:
АДГЕЗИОННЫЕ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Показано, что полимерные композитные материалы имеют важное значение в современной технике, поскольку характеризуются высокими показателями эксплуатационных параметров, в том числе улучшенной адгезионной прочностью, механическими и теплофизическими свойствами, что обеспечивает возможность их использования при обычных и повышенных температурах. В качестве основного компонента для связующего при формировании эпоксидных материалов выбран эпоксидный диановый олигомер марки ЭД-20. Для сшивания эпоксидных композиций использован отвердитель полиэтиленполиамин. В виде модификатора использовали фталимид. Молекулярная формула модификатора: $C_8H_5NO_2$. Молярная масса фталимида – 147,13 г/моль. Плотность – 1,47 г/см³. Модификатор растворим в воде и полярных органических растворителях. Доказано, что при введении модификатора фталимида в количестве 2,0 масс.ч. на 100 масс.ч. эпоксидного олигомера ЭД-20 формируется материал со следующими свойствами: адгезионная прочность при отрыве – 47,7 МПа, остаточные напряжения – 1,1 МПа. Это обеспечивает повышение по сравнению с исходной эпоксидной матрицей, показателей адгезионной прочности при отрыве в 1,9 раз, а остаточные напряжения при этом уменьшаются в 1,3 раза. Полученный композит целесообразно использовать в виде матрицы при формировании адгезионного слоя для защитных покрытий.

Экспериментально доказано, что для формирования материалов с улучшенными когезионными свойствами необходимо использовать композицию следующего состава: эпоксидный олигомер марки ЭД-20 (100 масс.ч.), отвердитель полиэтиленполиамин (10 масс.ч.), модификатор фталимид (0,25 масс.ч.). Формирование такого материала обеспечивает по сравнению с исходной эпоксидной матрицей повышение следующих показателей физико-механических свойств композитов: разрушающих напряжений при изгибе – от 48,0 МПа до 62,1 МПа; ударной вязкости – 7,4 кДж/м² до 14,7 кДж/м². Отметим, что модуль упругости такого материала уменьшается по сравнению с исходной эпоксидной матрицей от 2,8 ГПа до 2,2 ГПа. Полученный композит целесообразно использовать в виде матрицы при формировании поверхностного слоя для защитных покрытий.

Ключевые слова: матрица, эпоксидный композит, модификатор, адгезионные свойства, когезионная прочность, остаточные напряжения.

Buketov A. V., Chernyavska T. V., Ivchenko T. I., Klevtsov K. M., Fesenko I. P., Yatsyuk V. M. MODIFIED EPOXY MATRIX FOR VEHICLE PROTECTION: ADHESIVE AND PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES

It is shown that polymer composite materials are important in modern technology, as they are characterized by high performance parameters, including improved adhesion strength, improved mechanical and thermophysical properties.

The aim of this work is to investigate the effect of the phthalimide modifier on the adhesive and physico-mechanical properties of epoxy composite materials and protective coatings based on them.

The ED-20 epoxy diene oligomer was chosen as the main component for the binder in the formation of epoxy materials. Polyethylene polyamine hardener was used for crosslinking of epoxy compositions. Phthalimide was used as a modifier. Molecular formula of the modifier: $C_8H_5NO_2$. The molar mass of phthalimide is 147.13 g/mol.

It is proved that with the introduction of the phthalimide modifier in the amount of 2.0 wt.h. per 100 parts by weight epoxy oligomer ED-20 formed a material with the following properties: adhesive strength at separation – 47.7 MPa, residual stresses – 1.1 MPa. This provides an increase compared to the original epoxy matrix, the adhesive strength at break 1.9 times, and the residual stresses are reduced by 1.3 times. The obtained composite should be used in the form of a matrix in the formation of an adhesive layer for protective coatings.

It is experimentally proved that for the formation of materials with improved cohesive properties it is necessary to use a composition of the following composition: epoxy oligomer brand ED-20 (100 wt.h.), hardener polyethylene polyamine (10 wt.h.), modifier phthalimide (0.25 parts by weight). The formation of such a material provides compared to the original epoxy matrix to increase the following indicators of physical and mechanical properties of composites: destructive bending stresses – from 48.0 MPa to 62.1 MPa; impact strength – from 7.4 kJ/m² to 14.7 kJ/m². Note that the modulus of elasticity of this material decreases compared to the original epoxy matrix from 2.8 GPa to 2.2 GPa. The obtained composite should be used in the form of a matrix in the formation of the surface layer for protective coatings.

Keywords: matrix, epoxy composite, modifier, adhesive properties, cohesive strength, residual stresses.

© Букетов А. В., Чернявська Т. В., Івченко Т. І., Клевцов К. М., Фесенко І. П., Яцюк В. М.

Статтю прийнято

до редакції 20.07.20

УДК 629.56:539.4

ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ КОНСТРУКЦІЙ З МЕТАЛ-СКЛЯНИМИ ЗАХИСНИМИ ПОКРИТТЯМИ В УМОВАХ СУДНОВИХ ВІБРАЦІЙ

Казимиренко Ю. О., д-р техн. наук, професор кафедри матеріалознавства і технології металів Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, e-mail: u.a.kazimirenko@gmail.com, ORCID 0000-0002-7120-8226;

Лебедева Н. Ю., канд. техн. наук, доцент кафедри матеріалознавства і технології металів Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, e-mail: nataliia.lebedeva@nuos.edu.ua, ORCID 0000-0003-1326-450X

Стаття присвячена вирішенню науково-технічної проблеми зниження вібрацій на судах, що можливо застосуванням вібропоглинальних композиційних покриттів. Мета роботи полягає у теоретичному обґрунтуванні можливості експлуатації конструкцій з метал-скляними покриттями в умовах суднових вібрацій. Постановка досліджень включає у себе розв'язання задачі мікромеханіки для моделі двошарової пластини Ст3–метал-скляні покриття з урахуванням їх структурних особливостей, та експериментальні випробування на розтягування. За допомогою аналітичного опису мікросушних деформацій проаналізовано вплив полідисперсної структури покриттів на механізми поглинання пружно-пластичних хвиль динамічних коливань. Досліджено вплив морфології та об'ємного вмісту скляних наповнювачів, а саме порожніх скляних мікросфер, порошків натрійсількатного та свинцевмісного скла на коефіцієнт вібраційних витрат, границю міцності та границю текучості. Розрахунки показали доцільність застосування метал-скляних покриттів в умовах суднових вібрацій, що пояснюється поглинанням енергії скляними включеннями сферичної та кучастої форми. Експериментально доведено, що пластини з покриттями незначно поступаються у міцності на розрив зразкам із Ст3; руйнування покриттів відбувається між скляними включеннями. Одержані результати мають наукове і практичне значення для проектування суднових конструкцій з використанням композиційних матеріалів і покриттів.

Ключові слова: суднові конструкції, метал-скляні покриття, скляні включення, вібраційна здатність, мікросувні деформації.

DOI: 10.33815/2313-4763.2020.1.22.165-175

Постановка проблеми. Зниження суднових вібрацій є важливою науково-технічною проблемою, вирішення якої розглядається науковими школами [1, 2] на етапах проектування конструкцій. Динамічні коливання, які виникають під час роботи машинного відділення, гребних гвинтів, pomp, систем кондиціонування, радіонавігаційного обладнання, жорстко-закріплених механізмів значно ускладнюють умови життєдіяльності плавскладу [3]. У процесі експлуатації в умовах суднових вібрацій, температурних навантажень, можливих механічних пошкоджень у конструкціях формується складний напружений стан, де на процеси руйнування впливають структурні особливості матеріалів. В роботах [4, 5] розглянуто перспективи використання у суднобудуванні сплавів високого демпфірування: переваги впровадження марганцево-мідних, нікель-титанових, магнієвих сплавів пояснюється їх високою технологічністю і незалежністю ефектів демпфірування від частоти коливань. Використання біметалічних зварних з'єднань високомарганцевих марганцево-мідних сплавів з низьковуглецевими сталями є доцільним для виготовлення опор, станін, амортизаторів; проте їх застосування для більш великогабаритних конструкцій є невиправдано дорогим.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемним питанням підвищення демпфірувальних властивостей конструкційних матеріалів присвячено роботи [6-8], у яких досліджено ефекти впливу зміни хімічного складу, термічної обробки, поверхневого зміцнення. Наукові уявлення про механізми вібропоглинання ґрунтуються на теорії внутрішнього тертя, яка розглядає процеси перетворення на теплову [9]. Це пояснює переваги застосування композиційних матеріалів і покриттів, зокрема полімерних, у яких частка енергії механічного поля коливань розсіюється завдяки релаксаційним явищам у вигляді теплових хвиль [10]. Одним із шляхів зниження масогабаритних показників

суднобудівних конструкцій з реалізацією можливостей їх експлуатації за механізмами «розтягування–стискання» є застосування вібропоглинальних покриттів, перспективи впровадження яких обумовлені потребами у матеріалах, які, крім здатності послаблювати або поглинати енергію коливань, характеризуються ще низькою щільністю, водонепроникністю, термостійкістю [11]. Для багатьох полідисперсних середовищ явища поглинання енергії хвиль можна пояснити, аналізуючи мікромеханічні процеси у структурі композицій. У порівнянні з компактними металами і сплавами застосування гетерогенних матеріалів у вібраційних умовах є більш переважним, що пояснюється впливом скупчення мікронерівностей на процеси незворотного розсіювання енергії. Саме цей ефект утворюється і при введенні у композиції сферичних включень, зокрема порожніх скляних мікросфер, що переважно застосовуються для формування композицій типу «синтактик», експлуатація яких вважається ефективною в умовах динамічних коливань, статичних навантажень, гідростатичного стискання [12]. Визначеним вимогам відповідають метал-скляні електродугові покриття, які у складі конструкцій біологічного захисту застосовуються на судах і плавучих спорудах, призначених для транспортування і тривалого зберігання радіоактивних вантажів [13]. Результати експериментів з визначення їх демпфувальних властивостей наведено у роботі [14], проте вирішення завдань прогнозування міцності конструкцій вимагатиме комплексних досліджень з розв'язанням задач мікромеханіки, які б враховували структурні особливості метал-скляних композицій, зокрема вплив морфології та об'ємного вмісту скляних наповнювачів на механічні властивості та вібропоглинальну здатність.

Мета роботи полягає у теоретичному обґрунтуванні можливості експлуатації конструкцій з метал-скляними покриттями в умовах суднових вібрацій, для чого необхідно вирішити завдання, пов'язані з дослідженнями процесів поглинання енергії структурними елементами метал-скляних покриттів та впливом морфології та об'ємного вмісту скляних наповнювачів на міцнісні характеристики і вібропоглинальну здатність.

Матеріали і методики досліджень. Формування метал-скляних покриттів здійснювалось за технологією електродугового напилення суцільнотягнутих дротів марок Св-АМг5 (ГОСТ 7871-75) і Св-08Г2С (ГОСТ 2246-70) на поверхні із сталі звичайної якості Ст3 (ГОСТ 380-2005), що застосовується у суднобудуванні для виготовлення танків, цистерн, елементів біологічного захисту тощо. Вибір режимів та обладнання наведено в роботі [15]. В процесі напилення в зону дуги введено скляні наповнювачі: порожні скляні мікросфери натрійборсилікатного складу (ТУ 6-48-108-94), порошки, одержані сухим розмелом бою натрійсилікатного (ГОСТ 24315-802.0) та свінцевмісного стекло (ГОСТ 9541-75). Їх гранулометричний склад, форму та стан поверхні досліджено методами оптичної і комп'ютерної металографії з використанням мікроскопів БИОЛАМ-И і ММР-2Р, за допомогою яких також досліджено особливості мікроструктури напилених метал-скляних покриттів.

Теоретичні передумови досліджень ґрунтуються на наукових працях відомих вчених в області теорії пружності [9], мікромеханіки композитів [16], теорії пружно-пластичних деформацій оболонок [17], фундаментальних досліджень динамічних коливань у пружних середовищах [18]. Для прогнозування можливості розроблених метал-скляних покриттів працювати в умовах суднових вібрацій застосовано метод енергії деформацій [9], який авторами роботи [10] пристосовано для полімерних дисперсно-наповнених композитів, де важливими показниками визначено об'ємний модуль пружності K_m і модуль зсуву G^* . Для їх визначення із структури матеріалу виділяється певний елемент – елементарна комірка, яка складається із ділянки матриці, в середині якої розташовано дисперсне включення. Механічні властивості дисперсно-наповнених композитів визначаються з використанням основних положень теорії пружності [9] та описуються у аналітичному вигляді через ефективні пружні модулі.

Характеристика скляних наповнювачів і особливості структури покриттів. В табл. 1 наведено результати досліджень морфологічних характеристик скляних наповнювачів.

Таблиця 1 – Характеристики скляних наповнювачів

Скляний наповнювач	Дисперсність d , мкм	Середній розмір частинок d_{cp} , мкм	Середній фактор форми F_{cp}	Умовний модуль об'ємного стискування скляного включення K_s , ГПа
Порожні скляні мікросфери	20...100	40	1	41,72
Порошок натрійсилікатного скла	10...85	25	0,4	40,5
Порошок свінцевмісного скла	15...90	35	0,6	41,2

Напилений шар є структурно неоднорідним: як приклад на рис. 1 наведено оптичні мікрофотографії покриттів із Св-АМг5, наповнених порожніми скляними мікросферами (ПСМ) та скляних порошків, одержаних сухим розмелом скляного бою.

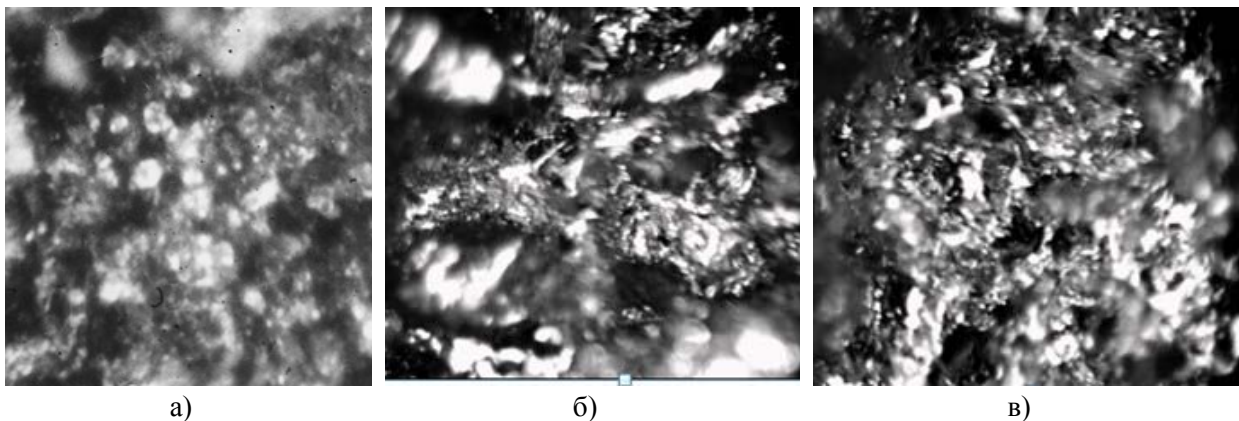


Рисунок 1 – Мікроструктура ($\times 350$) електродугових покриттів на основі Св-АМг5, наповнених ($\approx 40\%$ об'ємн.):

а) порожніми скляними мікросферами; б) порошком натрійсилікатного скла; в) – порошком свінцевмісного скла

Структура покриттів являє собою пористу (до 12 %) металеву матрицю з рівномірно розташованими скляними включеннями, на поверхні поділу між якими при динамічних навантаженнях відбуваються мікросувні деформації, які сприятимуть додатковому поглинанню енергії коливань.

Визначення характеристик модуля зсуву метал-скляних покриттів.

Процес вібропоглинання у структурно неоднорідному середовищі покриття можна описати через деформації мікрооб'ємів, використовуючи поняття ефективного модуля зсуву G^* як функції механічних властивостей матриці і наповнювачів у складі композицій (табл. 2).

Таблиця 2 – Мікромеханічні характеристики метал-скляних покриттів

Характеристика	Розрахункова формула
Умовний модуль об'ємного стискання металевої комірки зі скляним включенням, K_m – визначає здатність пористої матриці чинити опір всебічному стисканню	$K_m = \frac{K'_m \cdot \varrho_m}{1 + \rho(1 - \varrho_m)}$, де ϱ_m – об'ємний вміст металу; ρ – щільність покриття
Об'ємний модуль пружності металевої комірки зі скляним включенням K'_m – характеризує спроможність комірки чинити опір зміни її об'єму	$K'_m = \frac{E_m}{3(1 - 2\nu_m)}$, де E_m , ν_m – модуль пружності і коефіцієнт Пуасона
Умовний модуль об'ємного стискання скляного включення K_s – визначає локалізацію деформації матриці навколо скляної частинки	$K_s = \frac{K_{cm} \cdot \psi}{1 + \rho(1 - \psi)}$, де $\psi = \frac{\rho_s}{\rho_c}$, де ρ_s – уявна густина скляних частинок, ρ_c – густина скла, з якого вони одержані
Об'ємний модуль пружності скляного включення K_c – характеризує спроможність включення чинити опір з боку металевої матриці	$K_c = \frac{E_{cm}}{3(1 - 2\nu_c)}$, де E_{cm} , ν_c – модуль пружності і коефіцієнт Пуасона

Для досліджень використано модельні уявлення про елементарну комірку, виділену із структури покриття, яка складається із скляного включення з середнім розміром d , оточеного металевою матрицею (рис. 2).

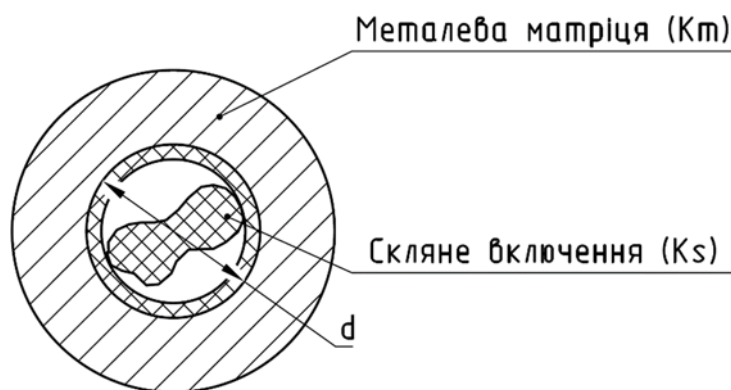


Рисунок 2 – Модель елементарної комірки метал-скляного покриття

Динамічні явища розсіювання енергії на сферичних включеннях та в залежності від їх розміру проаналізовані в роботі [18], де автори при розв'язанні задачі поглинання енергії за принципом Гамільтона розглядають сферичний об'єм з фіксованим радіусом R як однорідний масив, знехтуючи малим розміром включень. На відміну від цього в даній роботі геометрична інтерпретація моделі елементарної комірки метал-скляного покриття враховує морфологічні характеристики скляних включень, вписуючи мінімальні розміри суцільних частинок в середину мікросфер більших діаметрів. Як показали розрахунки, умовний модуль об'ємного стискання суцільної скляної частинки K_s за умовами наближення її форми до сферичної несуттєво відрізняється від K_s порожньої сфери (табл. 1), для якої $K_s = 41,72$ ГПа. Наведені в табл. 2 мікромеханічні характеристики на мікрорівні визначають спроможність елементарної комірки поглинати енергію хвиль і залежать від дисперсності, форми та наповнення склом. Об'єм скляних включень у складі метал-скляних

покриттів визначено методом хорд [20] за результатами мікроструктурних досліджень топографії поверхні.

Ефективні механічні характеристики метал-скляних покриттів з урахуванням їх пористої структури і об'ємного наповнення склом були визначені в роботі [19] і застосовуються для розрахунків ефективного модуля зсуву G^* за формулою Хашина-Штрикмана [9], яка для елементарної комірки (рис. 2) матиме вигляд

$$G^* = \frac{3 K_m}{4 \rho} \quad (1)$$

де K_m – умовний модуль стискання металевої матриці; ρ – щільності напиленого шару, яку розраховано за принципом адитивності для об'ємного наповнення від 10 до 40%, виходячи з технологічних обмежень напилення покриттів [14, 15].

Позитивний вплив об'ємного вмісту скляних включень на ефективний модуль зсуву G^* у графічному вигляді наглядно показаний на рис. 3.

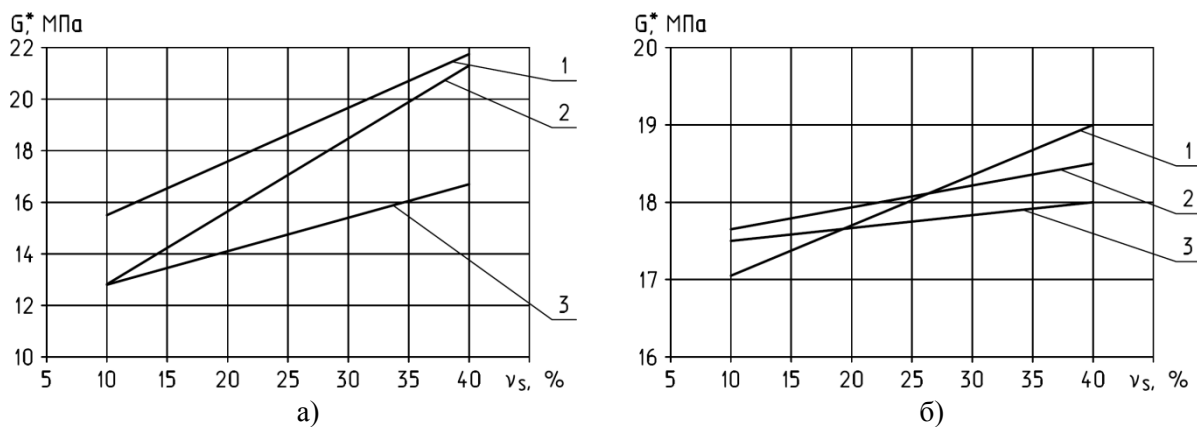


Рисунок 3 – Ефективний модуль пружності G^* метал-скляних покриттів а) на основі Sv-08Г2С; б) на основі Sv-AMг5, наповнених: 1 – РСМ; 2 – порошком свинцевмісного скла; 3 – натрійсилікатного скла

Розрахунки показали, що ефективний модуль зсуву покриттів на основі Sv-08Г2С на 10...15 % перевищує G^* для покриттів на основі Sv-AMг5: це пояснюється механічними властивостями металевої матриці. Як видно з рис. 3, найкращими показниками характеризуються покриття, наповнені порожніми скляними мікросферами, що обумовлено високою здатністю сферичних оболонок поглинати енергію динамічних коливань [17, 18] та зменшенням концентрації напружень на поверхні поділу фаз метал-скло [19]. Вплив фактору форми на опір метал-скляних покриттів зсувним деформаціям продемонстровано лініями 2 і 3, які визначають об'ємне наповнення порошками свинцевмісного скла краплеподібної форми та порошками натрійсилікатного скла кутастої форми.

Одержані значення використано для оцінювання вібропоглинальної здатності сталевих пластин з метал-скляними покриттями.

Визначення коефіцієнту вібраційних витрат двохшарової пластини. Об'єктом дослідження є процес поглинання вібрацій двохшаровою пластинною (рис. 4), яка складається із сталевого листа 1 товщиною $h_1 = 10$ мм і модулем повздовжньої пружності E_1 , на який нанесено шар 2 метал-скляного покриття товщиною $h_2 = 2$ мм і модулем повздовжньої пружності E_2 .

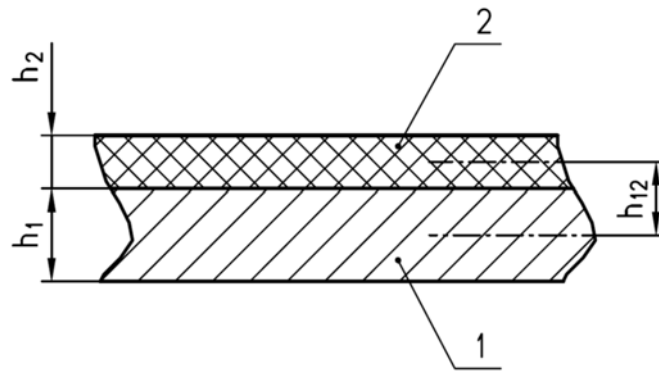


Рисунок 4 – Двошарова модель зразків для досліджень вібраційної здатності: 1 – сталевий лист; 2 – шар метал-скляного покриття

Поставлена задача полягає у дослідженні вібропоглинальної здатності сталеві пластини із Ст3, якщо на неї наноситься будь-який із складів розроблених метал-скляних покриттів з різним наповненням склом. В основу досліджень покладено гіпотезу про поглинання основної частки енергії полідисперсним шаром, у якому розсіювання пружних хвиль відбувається на скляних включеннях. Для спрощення при постановці задачі не враховується частота суднових вібрацій та міцність зчеплення покриття зі сталлю.

Складність експериментального визначення вібраційної здатності метал-скляних покриттів обумовлена великою розбіжністю результатів і погрішністю вимірювань через їх пористість. Для гетерогенних середовищ на практиці використовуються розрахункові та експериментальні методики [2, 21, 22] з аналітичним описом показників працездатності роботи конструкцій в умовах вібрацій.

За критерій обрано коефіцієнт вібраційних втрат $\eta_{вібр}$, який визначатиме здатність двошарової пластини (рис. 3) гасити вібрації та розраховується за формулою [21]

$$\eta_{вібр} = \frac{\eta(f)}{1 + [\alpha_2 \beta_2 (\alpha_2^2 + 12\alpha_{21}^2)]^{-1}}, \quad (2)$$

де $\eta(f)$ – коефіцієнт зсувних втрат матеріалу покриття; $\alpha_2 = \frac{h_2}{h_1}$ – відношення товщини шару покриття до товщини сталевого листа;

$\beta_2 = \frac{E_2}{E_1}$ – відношення модулів поздовжньої пружності метал-скляного покриття і сталевого листа;

$\alpha_{21} = \frac{h_{21}}{h_1}$, де h_{21} – відстань між центральними площинами.

Розрахунки виконано за наступними числовими значеннями [21]: $\eta(f) = (2...4) \cdot 10^{-3}$; $h_{21} = 6$ мм. Модуль поздовжньої пружності метал-скляного покриття визначається як $E_2 = 3G^*(f)$. Об'ємний вміст наповнювачів у складі метал-скляних покриттів становить від 10 до 40 %. При визначенні пружних модулів E_2 і G^* для формули (2) враховано ступінь відхилення їх фактору форми від ідеальної сферичності. Результати розрахунків значень коефіцієнта вібраційних втрат $\eta_{вібр}$ наведено у табл. 3.

Таблиця 3 – Коефіцієнти вібраційних втрат двошарових пластин СтЗ– покриття

Об'ємний вміст скла у складі композиції, %	Коефіцієнт вібраційних втрат $\eta_{\text{вібр}}$	Об'ємний вміст скла у складі композиції, %	Коефіцієнт вібраційних втрат $\eta_{\text{вібр}}$	Об'ємний вміст скла у складі композиції, %	Коефіцієнт вібраційних втрат $\eta_{\text{вібр}}$
Покриття Св-АМг5–ПСМ		Покриття Св-АМг5–натрійсилікатне скло		Покриття Св-АМг5–свинцевмісне скло	
10	0,5	10	0,43	10	0,4
40	0,46	40	0,41	40	0,39
Покриття Св-08Г2С–ПСМ		Покриття Св-08Г2С–натрійсилікатне скло		Покриття Св-08Г2С–свинцевмісне скло	
10	0,49	10	0,59	10	0,59
40	0,35	40	0,45	40	0,35

Виконані розрахунки показали, що пластина СтЗ–метал-скляне покриття при обраному співвідношенні товщин має достатньо високий коефіцієнт вібраційних втрат: 0,35...0,6, що свідчить про доцільність подальшого використання такого двошарового з'єднання в умовах суднових вібрацій. Збільшення у складі електродугових покриттів скляних наповнювачів призводить до зниження $\eta_{\text{вібр}}$ на 5...15 %, проте їх вібропоглинальна здатність через масштабний фактор не залежить від форми скляних включень.

Враховуючи той факт, що додаткове накладання механічних навантажень може викликати руйнування всієї двошарової конструкції, в роботі експериментально досліджено статичні механічні характеристики двошарових пластин.

Експериментальні дослідження двошарової пластини на розтягування. Границю міцності на розрив σ_b і границю текучості σ_t двошарових пластин визначено за результатами розтягування зразків за допомогою розривної машини ИР 5057-50; швидкість навантаження скла 2,5 мм/хв. Для випробувань застосовано пластини СтЗ розміром 140×100×1,5 мм з напиленими покриттями товщиною 1,5 мм; об'ємний вміст скляних наповнювачів у складі покриттів склав близько 40 %. Для порівняння розтягування зазнали зразки з покриттями із Св-08Г2С і Св-АМг5 без наповнювача. Одержані результати (табл. 4) зіставлено з механічними властивостями пластин СтЗ, розтягнутих за аналогічними умовами, де границя міцності на розрив σ_b складатиме 365,0 МПа, а границя текучості σ_t – 292,5 МПа.

Таблиця 4 – Механічні властивості двошарових пластин СтЗ–покриттями

Властивості	Скляний наповнювач у покритті			
	ненаповнене покриття	порожні скляні мікросфери	натрій-силікатне скло	свинце-вмісне скло
СтЗ з покриттям на основі Св-08Г2С ($\delta = 1,5$ мм)				
Границя міцності на розрив σ_b , МПа	323,0	315,0	344,0	318,0
Границя текучості σ_t , МПа	265,0	260,0	275,0	260,0
СтЗ з покриттям на основі Св-АМг5 ($\delta = 1,5$ мм)				
Границя міцності на розрив σ_b , МПа	327,0	328,0	338,18	336,15
Границя текучості σ_t , МПа	268,0	266,0	287,0	284,0

Результати досліджень показали, що зразки з покриттями незначно поступаються у міцності СтЗ: границя міцності на розрив σ_b у середньому на 15...20 % нижче ніж у пластин СтЗ, а границя текучості σ_t – приблизно на 10 %. Максимальні значення механічних

властивостей спостерігаються у зразках, наповнених порошками натрійсилікатного скла, що можна пояснити їх вихідними властивостями і фізико-хімічними процесами, що відбуваються під час електродугового напилення на поверхні поділу метал–скло. Мікроструктурні дослідження поперечного перетину розірваних зразків показали, що руйнування покриттів відбувається між скляними включеннями.

Порівняння результатів досліджень з літературними і експериментальними даними. Одержані результати досліджень носять узагальнений характер, опосередковано підтверджуються теоретичними роботами [10-12, 16-18] та узгоджуються з результатами, експериментально одержаними авторами у роботах [14, 19].

Наукове і практичне значення результатів та перспективи подальших досліджень. Одержані в роботі результати показали можливість експлуатації сталевих конструкцій з метал-скляними покриттями із Св-08Г2С і Св-АМг5, наповнених порожніми скляними мікросферами, порошками натрійсилікатного та свинцевмісного стекл, в умовах судових вібрацій і розширюють наукові уявлення про механізми поглинання енергії композиційними покриттями зі скляними включеннями. Удосконалено теоретичний підхід до визначення вібраційної здатності двошарових пластин з гетерогенним шаром, який враховує механізми зсувних деформацій на поверхні поділу фаз, виходячи із об'ємного наповнення склом.

Практична цінність роботи полягає у якісній оцінці можливості експлуатації сталевих конструкцій з метал-скляними покриттями в умовах динамічних і статичних навантажень.

Подальші дослідження пов'язано з апробацією одержаних результатів на масштабному факторі, розробленням практичних рекомендацій щодо експлуатації з визначенням певних величин частот судових вібрацій.

Висновки

1. За допомогою аналітичного опису мікрозсувних деформацій на поверхні поділу фаз метал–скло проаналізовано вплив полідисперсної структури метал-скляних електродугових покриттів на основі Св-08Г2С і Св-АМг5, наповнених порожніми скляними мікросферами, порошками натрійсилікатного і свинцевмісного стекл, на механізми поглинання пружно-пластичних хвиль динамічних коливань. Визначено, що ефективний модуль зсуву покриттів на основі Св-08Г2С на 10...15 % перевищує G^* для покриттів на основі Св-АМг5; найкращими показниками характеризуються покриття, наповнені порожніми скляними мікросферами.

2. За результатами розв'язання задачі мікромеханіки встановлено вплив об'ємного вмісту скляних порошоків (10...40 %), введених до складу електродугових покриттів із Св-08Г2С і Св-АМг5, на коефіцієнт вібраційних втрат $\eta_{вібр}$ двошарової пластини Ст3–покриття, який складатиме 0,35...0,6. Збільшення у складі електродугових покриттів скляних наповнювачів призводить до зниження $\eta_{вібр}$ на 5...15 %, проте їх вібропоглинальна здатність через масштабний фактор не залежить від форми скляних включень.

3. Експериментально досліджено вплив метал-скляних покриттів на статичні механічні характеристики сталевих пластин: нанесення шару товщиною 1,5 мм на 15...20 % знижує границю міцності на розрив σ_b і приблизно на 10 % – границю текучості σ_t ; найвищі показники міцності мають покриття, наповнені порошком натрійсилікатного скла.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Дятченко, С. В. Исследование влияния конструкции корпуса и загрузки промышленного судна и его вибрационные характеристики / С. В. Дятченко, С. В. Тананыкин // Изв. КГТУ. – Калининград, 2007. – № 12. – С. 36–41.

2. Иванов, Н. И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом / Н. И. Иванов. – М. : Университетская книга : Логос, 2008. – 424 с.
3. Факторы, формирующие среду обитания при эксплуатации объектов водного транспорта / Л. М. Мацкевич, А. М. Вишнеvский, А. Б. Разлетова [и др.] // Казанский медицинский журнал. – 2009. – Т. 90. – № 4. – С. 597-600.
4. Металловедение высокодемпфирующих сплавов : монография / Ю. К. Фавстов, Ю. Н. Шульга, А. Г. Рахштадт. – М. : Металлургия, 1980. – 272 с.
5. Лебедева Н. Ю. Исследование свариваемости высокодемпфирующего марганцево-медного сплава Г80Д15Х3Н2 / Н. Ю. Лебедева // Зб. наук. праць УДМТУ. – Миколаїв : УДТУ, 2002. – № 4 (382). – С. 72-77.
6. Башенко Г. А. Влияние легирования на выделение охрупчивающих фаз при старении сплавов системы Mn-Cu // МиТОМ. – 1999. – № 11. – С. 36-39.
7. Лебедева Н. Ю. Влияние термической обработки и температур нагрева на демпфирующие свойства марганцево-медных сплавов / Н. Ю. Лебедева // Зб. наук. праць УДМТУ. – Миколаїв : УДТУ, 2002. – № 3 (381). – С. 48-52.
8. Зенькович А. А. Упрочнение поверхности титанового сплава ВТ6 в результате электропластической деформации / А. А. Зенькевич, В. И. Проскуряков, И. С. Егоров, А. Ю. Щелкунов // Молодой ученый. – 2019. – № 25 (263). – С. 106-108.
9. Landau, L. D. Teorija uprugosti / L. D. Landau, E. M. Livshic. – Moskva : Fizmatiz, 2007. – 264 p.
10. Черкасов В. Д. Прогнозирование демпфирующих свойств композита с учетом температурной зависимости свойств полимера / В. Д. Черкасов, Ю. В. Юркин, В. И. Авдонин // Вестник ТГАСУ. – 2012. – № 4. – С. 216-225.
11. Кирпичников В. Ю. Разработка новых высокоэффективных средств вибродемпфирования судовых конструкций / В. Ю. Кирпичников, В. В. Савченко, В. Ю. Смольников, Ю. Ф. Шлемов // Труды Крыловского государственного центра. – 2019. – № 1 (387). – С. 167-174.
12. Разрушение сферопластика при статических и динамических нагрузках / С. А. Атрошенко, С. И. Кривошеев, А. А. Уткин и др. // Журн. техн. физики. – 2002. – Т. 72, вып. 12. – С. 54–58.
13. Kazymyrenko, Y. The Thermomechanical Processes in metal-glass Coating of Vessel Constructions and Floating Facilities for radioactive Cargo / Y. Kazymyrenko // The advanced science. – 2016. – Iss. 2. – P. 38–44.
14. Исследование демпфирующих свойств электродуговых покрытий, наполненных полыми стеклянными микросферами / Ю. А. Казимиренко, Н. Ю. Лебедева, А. А. Карпеченко и др. // Зб. наук. пр. НУК. – Миколаїв : НУК, 2013. – № 1 (446). – С. 56–59.
15. Формирование электродуговых покрытий с повышенной прочностью, демпфирующей способностью и коэффициентом поглощения излучений / Ю. А. Казимиренко, Н. Ю. Лебедева, А. А. Карпеченко и др. // Наукові нотатки : міжвуз. зб. – Луцьк : ЛНТУ, 2013. – № 41, ч. 1. – С. 117–121
16. Ванин, Г. А. Микромеханика композиционных материалов / Г. А. Ванин. – К. : Наук. думка, 1985. – 304 с.
17. Вольмир, А. С. Устойчивость деформируемых систем / А. С. Вольмир. – М. : Наука, 1967. – 984 с.
18. Пирс, А. Д. Колебания сферических включений в упругих твердых телах / А. Д. Пирс // Акустический журнал. – 2005. – Т. 51, № 1. – С. 9–22.
19. Kazymyrenko, Y. The Effective Mechanical Properties of Metal-Glass Materials / Y. Kazymyrenko // The advanced science journal. – 2016. – Iss. 1. – P. 90–94.
20. Салтыков, С. А. Стереометрическая металлография / С. А. Салтыков. – М. : Металлургия, 1976. – 271 с.
21. Валянтис, К. И. Расчет коэффициента потерь металлической пластины, облицованной вибропоглощающим покрытием из высоконаполненного полиуретана

[Электронный ресурс] / К. И. Валянтис, Ю. Н. Попов, С. А. Шляпочников // Материалы науч. конф. «Сессия Научного совета РАН по акустике и XXVII сессия Российского акустического общества». – Режим доступа : <http://www.ejta.org>.

22. Писаренко, Г. С. Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов : справочник / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев. – К. : Наук. думка, 1971. – 375 с.

REFERENCES

1. Djatchenko, S. V., & Tananykin, S. V. (2007). Issledovanie vlijaniya konstrukcii korpusa i zagruzki promyslovogo sudna i ego vibracionnye harakteristiki. *Izv. KGTU(12)*, str. 36-41.
2. Ivanov, N. I. (2008). *Inzhenernaja akustika. Teorija i praktika bor'by s shumom*. M.: Universitetskaja kniga : Logos.
3. Mackevich, L. M., Vishnevskij, A. M., & Razletova, A. B. (2009). Faktory, formirujushhie sredu obitanija pri jeksplucacii ob#ektov i vodnogo transporta. *Kazanskij medicinskij zhurnal*, 90(4), 597-600.
4. Favstov, Ju. N., Shul'ga, Ju. N., & Rahshtadt, A. G. (1980). *Metallovedenie vysokodempfirujushhijh splavov*. M.: Metallurgija.
5. Lebedeva, N. Ju. (2002). Issledovanie svarivaemosti vysokodempfirujushhego margancevo-mednogo splava G80D15H3N2. *Zb. nauk prac' UDMTU(4(382))*, 72-77.
6. Bashhenko, G. A. (1999). Vlijanie legirovaniya na vydelenie ohrupchivajushhijh faz pri sarenii splavov sistemy Mn-Cu. *MiTOM(11)*, 36-39.
7. Lebedeva, N. Ju. (2002). Vlijanie termicheskoj obrabotki i temperatur nagreva na dempфирujushhie svojstva margancevo-mednyh splavov. *Zb. nauk. prac' UDMTU(3(381))*, 48-52.
8. Zen'kovich, A. A., Proskurjakov, V. I., & Shhelkunov, A. Ju. (2019). Uprochnenie poverhnosti titanovogo splava VT6 v rezul'tate jelektroplasticheskoj deformacii. *Molodoj uchenyj(25(263))*, 106-108.
9. Landau, L. and Livshic, E. (2007). *Teorija uprugosti*. Moskva: Fizmatiz.
10. Cherkasov, V. D., Jurkin, Ju. V., & Avdonin, V. I. (2012). Prognozirovanie dempфирujushhijh svojstv kompozita s uchetom temperaturnoj zavisimosti svojstv polimera. *Vestnik TGASU(4)*, 216-225.
11. Kirpichnikov, V. Ju., Savchenko, V. V., Smol'nikov, V. Ju., & Shlemov, Ju. F. (2019). azrabotka novyh vysokojeffektivnyh sredstv vibrodempфирovaniya sudovyh konstrukcij. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo centra(1(387))*, 167-174.
12. Atroshenko, S. A., Krivosheev, S. I., & Utkin, A. A. (2002). Razrushenie sferoplastika pri staticheskijh i dinamicheskijh nagruzkah. *Zhurnal tehnichekoj fiziki*, 72(12), 54-58.
13. Kazymyrenko, Y. (2016). The Thermomechanical Processes in metal-glass Coating of Vessel Constructions and Floating Facilities for radioactive Cargo. *The advanced science journal(2)*, 38-44.
14. Kazymyrenko, Y. A., Lebedeva, N. Ju., & Karpechenko, A. A. (2013). Issledovanie dempфирujushhijh svojstv jelektrodugovyh pokrytij, napolnennyh polymi stekljannymi mikrosferami. *Zb. nauk. pr. NUK(1(446))*, 56-59.
15. Kazymyrenko, Y. A., Lebedeva, N. Ju., Karpechenko, A. A., & Zhdanov, A. A. (2013). Formirovanie jelektrodugovyh pokrytij s povyshennoj prochnost'ju, dempфирujushhej sposobnost'ju i koeficientom pogloshhenija izluchenij. *Naukovi notatki: mizhvuz. zb.*, 1(41), 117-121.
16. Vanin, G. (1985). *Mikromehanika kompozicionnyh materialov*. Kiev: Naukovadumka.
17. Vol'mir, A. S. (1967). *Ustojchivost' deformiruemyh sistem*. M.: Nauka.
18. Pirs, A. D. (2005). Kolebanija sfericheskijh vkljuchenij v uprugijh tverdyh tealh. *Akusticheskij zhurnal*, 51(1), 9-22.
19. Kazymyrenko, Y. (2016). The Effective Mechanical Properties of Metal-Glass Materials. *The advanced science journal(1)*, 90-94.
20. Saltykov, S. A. (1976). *Stereometricheskaja metallografija*. M.: Metallurgija.

21. Valjantis, K. I.; Popov, Ju. N.; Shljapochnikov, S. A.; (2012). Raschet koefefficienta poter' metallicheskoj plastiny, oblicovannoj vibropogloshhajushhim pokrytiem iz vysokonapolnennogo poliuretana. Sessija Nauchnogo soveta RAN po akustike i XXVII sessija Rossijskogo akusticheskogo obshhestva.

22. Pisarenko, G. S., Jakovlev, A. P., & Matveev, V. V. (1971). Vibropogloshhajushhie svojstva konstrukcionnyh materialov. K.: Naukova dumka.

Казимиренко Ю. А., Лебедева Н. Ю. ПОВЫШЕНИЕ ВИБРАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ СУДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ С МЕТАЛЛ-СТЕКЛЯННЫМИ ЗАЩИТНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

Статья посвящена решению научно-технической проблемы снижения вибраций на судах с помощью нанесения вибропоглощающих композиционных покрытий. Цель работы заключается в теоретическом обосновании возможности эксплуатации конструкций с металл-стеклянными покрытиями в условиях судовых вибраций. Постановка исследований включает в себя решение задачи микромеханики, поставленной на модели двухслойной пластины Ст3–металл-стеклянные покрытия, учитывающей их структурные особенности, а также механические испытания на растяжение. С помощью аналитического описания микродвиговых деформаций проанализировано влияние полидисперсной структуры покрытий на механизм поглощения упруго-пластических волн динамических колебаний. Исследовано влияние морфологии и объемного содержания стеклянных наполнителей, а именно порошков натрийсиликатного и свинцовосодержащего стекла на коэффициент вибрационных потерь, предел прочности и предел текучести. Расчеты показали целесообразность применения металл-стеклянных покрытий в условиях судовых вибраций, что объясняется поглощением энергии стеклянными включениями сферической и угловатой формы. Экспериментально показано, что пластины с покрытиями незначительно уступают в прочности на разрыв образцам из Ст3; разрушение покрытий происходит между стеклянными включениями. Полученные результаты имеют научное и практическое значение для проектирования судовых конструкций с использованием композиционных материалов и покрытий.

Ключевые слова: судовые конструкции, металл-стеклянные покрытия, стеклянные включения, вибрационная способность, микродвиговые деформации.

Kazymyrenko Y., Lebedieva N. THEORETICAL PREREQUISITES FOR OPERATION OF STRUCTURES WITH METAL-GLASS PROTECTIVE COATINGS IN THE CONDITIONS OF VESSEL VIBRATIONS

The article is devoted to solving the scientific and technical problem of reducing vibrations on vessels, which is possible with the use of vibration-absorbing composite coatings. The purpose of the work is to theoretically substantiate the possibility of operation of structures with metal-glass coatings in the conditions of vessel vibrations. The research included solving the problem of micromechanics for the model of a two-layer plate St3 – metal-glass coatings, taking into account their structural features, and experimental tensile tests. The influence of the polydisperse structure of coatings on the mechanisms of absorption of elastic-plastic waves of dynamic oscillations has been analyzed with the help of the analytical description of microdisplain deformations. The influence of morphology and volume content of glass fillers, namely hollow glass microspheres, powders of sodium silicate and lead-containing glass on the vibration coefficient, strength limit and yield strength has been investigated. Calculations have shown the feasibility of using metal-glass coatings in conditions of vessel vibration, which is due to the absorption of energy by glass inclusions of spherical and angular shape. It has been experimentally proved that coated plates are slightly inferior in tensile strength to samples with St3; the destruction of coatings occurs between glass inclusions. The obtained results have scientific and practical significance for the design of ship structures using composite materials and coatings.

Keywords: vessel structures, metal-glass coatings, glass inclusions, vibration ability, microslide deformations.

© Казимиренко Ю. О., Лебедева Н. Ю.

Статтю прийнято
до редакції 14.05.20

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ

До друку приймаються статті з результатами власних оригінальних досліджень, що мають наукову і практичну значущість і не публікувалися досі. До друку **не приймаються суто оглядові статті**. Відповідальність за зміст статті несе автор.

Згідно з вимогами п. 3 Постанови Президії Вищої Атестаційної Комісії України № 7-05/1 від 15.01.2003 р., наукові статті, що надаються до друку, повинні містити наступні елементи: постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких започатковано розв'язання даної проблеми, на які посилається автор; виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується стаття; формулювання цілей статті (постановка завдання); викладення основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів; висновки щодо даного дослідження та перспективи подальших наукових досліджень у даному напрямку.

Обсяг статей – до 10 сторінок, включаючи всі матеріали, у т. ч. таблиці, рисунки, графіки та список літературних джерел. Сумарний обсяг рисунків і таблиць повинен бути не більше 30% обсягу основної частини.

Оформлення статті. На першій сторінці рукопису зазначається код УДК, назва роботи, прізвище, ініціали та науковий ступінь (звання) автора(ів).

Код УДК – по лівому краю, розмір шрифту – 10.

Назва – по центру друкованими літерами (шрифт жирний, розмір шрифту – 14).

Інформація про автора(ів): прізвище, ініціали, науковий ступінь, вчене звання, повна назва установи або громадської організації, посада, держава, ORCID автора – курсивом, по лівому краю, розміром шрифту 12.

Текст надається у форматі редактора MS Word шрифтом Times New Roman, розмір шрифту – 12, інтервал – 1.

Параметри сторінки (опція меню ФАЙЛ, Параметри сторінки):

розмір паперу – А4: 210*297 мм;

орієнтація аркуша – книжна (альбомна не допускається);

поля – 2 см;

палітурка – 0 см;

колонтитули – 1,3 см;

абзацний відступ – 1,25 см, вирівнювання за шириною, сторінки без нумерації.

Формули повинні бути набрані за допомогою вбудованого редактора формул Equation Editor. Всі формули вставляються в таблицю з неокресленим контуром, що складається з двох колонок: у першій знаходиться формула без абзацу і вирівняна по центру, у другій – номер формули (якщо такий є) теж без абзацу і з вирівнюванням по центру. Межа між колонками таблиці встановлюється на позначці 14 см.

Це стосується також формул і символів формул, які стоять по тексту. Параметри в редакторі формул повинні в точності відповідати наведеним

нижче. Розміри (опція меню редактора Equation Editor: РОЗМІР, Визначити ...):

- Звичайний 12 пт.
- Крупний індекс 7 пт.
- Дрібний індекс 5 пт.
- Крупний символ 18 пт.
- Дрібний символ 12 пт.

Таблиці набираються у Microsoft Word.

Рисунки повинні бути чорно-білими, бажано прозорими, і вставлені у файл і роздруківку статті. Формат рисунків (tif, psx, bmp тощо) повинен бути сумісний з редактором тексту Microsoft Word. Роздільна здатність рисунків – не менше 300 dpi.

Структура статті: вступ (постановка задачі або проблеми); рішення задачі (мета, задачі, об'єкти, предмети, методи дослідження); основні результати та висновки з перспективами; список використаних літературних джерел. Основні розділи можуть мати назви, відмінні від приведених вище найменувань.

Список використаної літератури подається загальним списком у кінці рукопису (послідовність – у порядку згадування по тексту) згідно зі встановленими вимогами стандарту ДСТУ ГОСТ 7.1:2006. У списку повинно бути не менше 10 джерел, у списку посилань неприпустимо використання ГОСТів та загальнонаціональних стандартів, відсоткове співвідношення самоцитування – не більше 30 % (тобто якщо Ви використали 10 посилань, з них може бути не більше 3 на роботи автора).

До статті також наводиться перелік літератури латиницею (*References*), для його оформлення використовувати APA-стиль. Список літератури транслітерується або перекладається англійською мовою. Транслітерувати інформацію необхідно відповідно до постанови Кабінету Міністрів України від 27.01.2010 «Про впорядкування транслітерації українського алфавіту латиницею» (транслітерацію української мови можна здійснити за посиланням <http://translit.kh.ua> [обрати стандарт: Паспортний (КМУ 2010)]). Транслітерувати джерела, які пишуться латиницею не потрібно.

Структуровані анотації українською, російською та англійською мовами обсягом від 1800 знаків без пробілів надаються: на мові оригіналу статті перед вступом, на двох інших мовах – після тексту статті. У кінці анотацій наводяться ключові слова.

Документи, що подаються до редакції.

Для публікації автор повинен надати до відділу технічної інформації ХДМА:

- Комп'ютерний варіант статті – файл, набраний у редакторі Microsoft Word;
- файл кожного рисунка, включеного в статтю, окремо;
- рукопис статті (на паперовому носії), підписаний автором(ами) – 2 примірники.

Крім тексту статті автором(ами) надаються:

- структурована анотація та ключові слова українською, англійською і російською мовами, включаючи назву статті та прізвища авторів трьома мовами – на окремій сторінці;
- ліцензійний договір;
- відомості про авторів (прізвище, ім'я, по батькові, вчений ступінь, вчене звання, місце роботи, посада, домашня або службова адреса, контактний телефон, e-mail, наукові інтереси авторів, ORCID автора(ів)) – на окремій сторінці.

Редакційна колегія залишає за собою право як не публікувати роботи у разі їх відхилення, так і приймати рішення щодо їх відповідності напрямом журналу. Рукописи авторам не повертаються.

ЗМІСТ

МОРСЬКИЙ ТА РІЧКОВИЙ ТРАНСПОРТ

- Габрук Р. А.** 4
БЕЗПЕКА ДИНАМІЧНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ РУХОМОГО
ОБ'ЄКТУ ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ ПРИ НАКЛАДАННІ ПРИЧИН
ВІДМОВ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ВІД РІЗНИХ НЕЗАЛЕЖНИХ
ДЖЕРЕЛ
- Голіков А. О., Олійник Ю. А.** 11
ОЦІНКА РИЗИКІВ ТА РІВНЯ БЕЗПЕКИ ПРИ ЗІТКНЕННІ СУДНА З
МОСТОМ
- Зинченко С. Г.** 22
КОНТРОЛЛИНГ РАБОТЫ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ
СИСТЕМЫ МОРСКОГО ПОРТА
- Кальба Я. Є.** 35
ДО ПРОБЛЕМИ СТРЕСОСТІЙКОСТІ МАЙБУТНІХ ОФЦЕРІВ
МОРСЬКОГО ФЛОТУ
- Паламарчук І. В.** 45
МОДЕЛЮВАННЯ РОЗХОДЖЕННЯ СУДЕН У СИСТЕМІ ПІДТРИМКИ
ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ СУДНОВОДІЯ
- Хуссейн Ю. М., Янчецкий А. В.** 54
ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СПОСОБЫ РАСХОЖДЕНИЯ СУДОВ И АНАЛИЗ
ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ
- Цымбал М. Н.** 64
ФОРМИРОВАНИЕ ПЛАНА ЗАГРУЗКИ КОНТЕЙНЕРОВОЗА
- Чернявська Т. В.** 74
МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ РОБОТИ УСТАТКУВАННЯ
РІЧКОВОГО ТА МОРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ ЗА РАХУНОК
ВИКОРИСТАННЯ МОДИФІКОВАНИХ ЗАХИСНИХ
АНТИКОРОЗІЙНИХ ПОКРИТТІВ

ІНЖЕНЕРІЯ У ТРАНСПОРТНІЙ ГАЛУЗІ

- Блінцов В. С., Клочков О. П., Куценко П. С.** 86
КЛАСИФІКАЦІЙНІ ОЗНАКИ НЕНАСЕЛЕНИХ ПРИВ'ЯЗНИХ
ПІДВОДНИХ СИСТЕМ ЯК СКЛАДОВА ПІДВИЩЕННЯ
ЕФЕКТИВНОСТІ ЇХ ПРОЄКТУВАННЯ

Луняка К. В., Ключев О. І., Русанов С. А., Ключева О. О. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОЛОЖЕННЯ ТРУБКИ В ПУЧКУ ТРУБ КОЖУХОТРУБЧАСТОГО ТЕПЛООБМІННИКА НА ПРОЦЕС ТЕПЛОВІДДАЧІ	98
Проценко В. О., Бабій М. В., Настасенко В. О., Маринченко Д. О., Мартишевський Д. О. АНАЛІЗ ПРИЧИН ВИНИКНЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВІДМОВ ЕЛЕМЕНТІВ ПРИВОДУ ПАЛИВНОГО НАСОСА ВИСОКОГО ТИСКУ СУДНОВОГО ДИЗЕЛЯ MaK M43	109
Самарін О. Є., Врублевський Р. Є. ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОЧИЩЕННЯ ОХОЛОЖУВАЧА ПРОДУВНОГО ПОВІТРЯ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГУНА	120
Стрілець О. Р., Малащенко В. О., Стрілець В. М. ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ПРИСТРОЮ ДЛЯ КЕРУВАННЯ ЗМІНАМИ ШВИДКОСТІ З ЗУБЧАСТИМ ДИФЕРЕНЦІАЛОМ І ЗАМКНУТОЮ ГІДРОСИСТЕМОЮ ЧЕРЕЗ ВОДИЛО	131
Щедролюсєв О. В., Узлов О. М., Кириченко К. В. УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВУЗЛІВ З'ЄДНАННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННОГО ПОНТОНА З ПОПЕРЕЧНОЮ ДІАФРАГМОЮ ТА МЕТАЛЕВОЮ БАШТОЮ ПЛАВУЧОГО КОМПОЗИТНОГО ДОКУ	142
<i>МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО</i>	
Браїло М. В., Якущенко С. В., Кобельник О. С., Букетова Н. М., Вороненко С. В. СТВОРЕННЯ НАНОАПОВНЕНИХ ЕПОКСИ-ПОЛІЕФІРНИХ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ЗАХИСТУ ЕЛЕМЕНТІВ СУДНОВИХ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ	154
Букетов А. В., Чернявська Т. В., Соценко В. В., Івченко Т. І., Клевцов К.М., Фесенко І. П., Яцюк В. М. МОДИФІКОВАНА ЕПОКСИДНА МАТРИЦЯ ДЛЯ ЗАХИСТУ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ: АДГЕЗІЙНІ ТА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ	163
Казимиренко Ю.О., Лебедєва Н. Ю. ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ КОНСТРУКЦІЙ З МЕТАЛ-СКЛЯНИМИ ЗАХИСНИМИ ПОКРИТТЯМИ В УМОВАХ СУДНОВИХ ВІБРАЦІЙ	175
ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ	186

CONTENTS

SEA AND RIVER TRANSPORT

Habruk R. A. SAFETY OF DYNAMIC POSITIONING OF WATER TRANSPORT MOBILE OBJECTS IN THE SUPERIOR OF REASONS FOR TECHNICAL SYSTEMS FAILURE FROM DIFFERENT INDEPENDENT SOURCES	4
Holikov A.A., Oleynik J.A. RISK AND SAFETY LEVEL ASSESSMENT OF SHIP — BRIDGE COLLISION	11
Zynchenko S. H. CONTROL OF TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL SYSTEM OF A SEA PORT	22
Kalba Y. Y. CONCERNING THE ISSUE OF STRESS RESISTANCE OF FUTURE MARITIME OFFICERS	35
Palamarchuk I.V. MODELING THE MISCONVERGENCE OF SHIPS IN THE DECISION SUPPORT SYSTEM OF THE NAVIGATOR	45
Khussein Yu. M., Yanchetsky O.V. ADVANCED METHODS OF SHIPS' MISCONVERGENCE AND ANALYSIS OF THEIR EFFICIENCY	54
Tsymbal M. M. THE FORMATION OF THE CONTAINER VESSEL LOADING PLAN	64
Cherniavska T. V. THE METHOD OF INCREASING THE SERVICE LIFE OF RIVER AND SEA TRANSPORT EQUIPMENT THROUGH THE USE OF MODIFIED PROTECTIVE ANTI-CORROSION COATINGS	74

ІНЖЕНЕРІЯ У ТРАНСПОРТНІЙ ГАЛУЗІ

Blintsov V. S., Klochkov O. P., Kucenko P. S. CLASSIFICATION CHARACTERISTICS OF UNMANNED TETHERED UNDERWATER SYSTEMS AS A COMPONENT OF IMPROVING THE EFFICIENCY	86
---	----

Lunyaka K.V., Kliuiev O.I., Rusanov S.A., Kliuieva O.O. STUDY OF THE INFLUENCE OF THE TUBE POSITION IN THE TUBE BUNDLE OF THE SHELL AND TUBE HEAT EXCHANGER ON THE PROCESS OF HEAT TRANSFER	98
Protsenko V.O., Babiy M.V., Nastasenکو V.O., Marynchenko D. O., Martyshevskiy D.O. ANALYSIS OF THE OPERATIONAL FAILURES REASONS OF MARINE DIESEL MAK M43 FUEL INJECTION PUMP DRIVE ELEMENTS	109
Samarin O. E., Vryblevskiy R. Ye. IMPROVING THE CLEANING EFFICIENCY OF THE DIESEL ENGINE PURGE AIR COOLER	120
Strilets O., Malashchenko V., Strilets V. DYNAMIC MODEL OF SPEED CHANGE CONTROL DEVICE WITH DIFFERENTIAL GEAR AND CLOSED-LOOP HYDROSYSTEM VIA CARRIER	131
Shchedrolosiev O., Uzlov O., Kyrychenko K. IMPROVING CONSTRUCTIVE AND TECHNOLOGICAL CONNECTING JOINTS OF REINFORCED CONCRETE PONTOON WITH A TRANSVERSE DIAPHRAGM AND A METAL TOWER IN A FLOATING COMPOSITE DOCK	142
<i>MATEPIAΛIOZHABCTBO</i>	
Brailo M., Yakushchenko S., Kobelnik O., Sotsenko V.V., Buketova N., Voronenko S. GENERATION OF NANO-FILLED EPOXY-POLYESTER COMPOSITE MATERIALS FOR PROTECTION OF ELEMENTS OF VESSEL TECHNICAL MEANS	154
A Buketov A. V., Chernyavska T. V., Ivchenko T. I., Klevtsov K. M., Fesenko I. P., Yatsyuk V. M. MODIFIED EPOXY MATRIX FOR VEHICLE PROTECTION: ADHESIVE AND PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES	163
Kazymyrenko Y., Lebedieva N. THEORETICAL PREREQUISITES FOR OPERATION OF STRUCTURES WITH METAL-GLASS PROTECTIVE COATINGS ON BOARD A VESSEL IN VIBRATION ENVIRONMENT	175
APPLICATION REQUIREMENTS	186

Науковий журнал

НАУКОВИЙ ВІСНИК
ХЕРСОНСЬКОЇ ДЕРЖАВНОЇ МОРСЬКОЇ АКАДЕМІЇ

№ 1 (22), 2020

Відповідальний за випуск *Р. Є. Врублевський*
Технічний редактор *О. Ю. Клементьєва*
Коректор *Н. М. Грем*
Коректура англійської мови *А. С. Волкова*
Друк, фальцювальні-палітурні роботи *В. Г. Удов*

Підписано до друку 05.10.2020. Формат 84×108/32.
Папір офсетний.
Ум. др. арк. 12,25. Наклад 100 прим.

Видавець і виготовлювач ХДМА
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 4319 від 10.05.2012
73000, м. Херсон, просп. Ушакова, 20