

ISSN 2313-4763

Міністерство освіти і науки України

Херсонська державна морська академія

НАУКОВИЙ ВІСНИК
ХЕРСОНСЬКОЇ ДЕРЖАВНОЇ МОРСЬКОЇ АКАДЕМІЇ

Науковий журнал

Виходить двічі на рік

№ 2 (23)

Херсон
2020

Науковий вісник Херсонської державної морської академії : науковий журнал. Херсон : Херсонська державна морська академія, 2020. № 2 (23). 148 с.

Засновник і видавець – Херсонська державна морська академія

Рекомендовано до друку на засіданні Вченої ради Херсонської державної морської академії (протокол № 5 від 14.12.2020 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 Щ. 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 внесено 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 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

ISSN 2313-4763

Ministry of Education and Science of Ukraine

Kherson State Maritime Academy

SCIENTIFIC BULLETIN

KHERSON STATE MARITIME ACADEMY

Science journal

Published twice a year

№ 2 (23)

Kherson
2020

Scientific bulletin Kherson State Maritime Academy: science journal. Kherson : Kherson State Maritime Academy, 2020. № 2 (23). 148 p.

Founder and publisher – Kherson State Maritime Academy

Recommended to the publishing in a panel session of Kherson State Maritime Academy Academic Board (minutes of the panel session № 5 from 14.12.2020)

EDITORIAL STAFF:

Buketov A.V., Doctor of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, chief editor.

Thematic scope – Transport technologies:

Hnatov A.V., Doctor of Engineering Science, Kharkiv National Highway University, Ukraine, publishing editor of the section;

Arhun Sch.V., PhD in engineering Science, Kharkiv National Highway University, Ukraine, member of the editorial board;

Liashuk O.L., Doctor of Engineering Science, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine, member of the editorial board;

Patlins Antons, Doctor of Engineering Science, Riga Technical University, Latvia, member of the editorial board;

Sharko V.O., Doctor of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of the editorial board.

Thematic scope – Automation and computer-integrated technologies:

Rozhkov S.O., Doctor of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, publishing editor of the section;

Zhuk D.O., PhD in engineering Science, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Ukraine, member of the editorial board;

Zhiravetska Anastasia, Dr. Sc. Ing., Professor, Riga Technical University, Latvia, member of the editorial board;

Polivoda O.V., PhD in engineering Science, Kherson National Technical University, Ukraine, member of the editorial board;

Stepenko S.M., PhD in engineering Science, Chernihiv National University of Technology, Ukraine, member of the editorial board;

Khlopenko M.Ya., Doctor of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of the editorial board.

Thematic scope – Materials sciences:

Sapronov O.O., Doctor of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, publishing editor of the section;

Akimov O.V., PhD in engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of the editorial board;

Brailo M. V., PhD in engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of the editorial board;

Dulebová Ľudmila, PhD., assoc. Prof., Technical University of Kosice, Slovakia, member of the editorial board;

Syzonenko O.M., Doctor of Engineering Science, Institute of Pulse Processes and Technologies, NAS of Ukraine, member of the editorial board;

Stukhliak P.D., Doctor of Engineering Science, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine, member of the editorial board;

Fesenko I.P., Doctor of Engineering Science, V. Bakul Institute of Superhard Materials, NAS of Ukraine, member of the editorial board.

Address of the editorial board: 20, Ushakova av., Kherson, Ukraine, 73000,
phone +38 (0552) 22-35-69

Certificate of registration of the published media outlet by Resolution № 18987-7776PIP from 11.05.2012.

The journal has been brought into the list of scientific professional editions of Ukraine of category “B” (the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine № 886 from 02.07.2020).

The journal is being indexed by Ukrainian national abstract database «**Ukrainika Scientific**», international scientometric database «**Scientific Electronic Library E-Library.Ru**» (the Russian Science Citation Index – RCSI), international abstract database **Google Scholar**, international scientometric database **Researchbib**, presented at the **Scientific E-library of Vernadsky National Library of Ukraine**, international fulltext scientific database **Crossref**.

ISSN 2313-4763

© Scientific bulletin Kherson State
Maritime Academy, 2020

МОРСЬКИЙ ТА РІЧКОВИЙ ТРАНСПОРТ

SEA AND RIVER TRANSPORT

ОЦІНКА СТАНУ ЗАСОБІВ НАВІГАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НА НЕБЕЗПЕЧНІЙ ДІЛЯНЦІ РІКИ ДНІПРО

Гладких І. І., д.т.н., професор Національного університету «Одеська морська академія», e-mail: gladkykh958@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7695-3874;

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

Модернізація портів і фарватерів, а також останні досягнення науки в розвитку нових технологій і зростаючий попит на навігаційні послуги роблять необхідною динамічну модернізацію та підсилення систем засобів навігаційного забезпечення (ЗНЗ). Розміщення ЗНЗ безпосередньо впливає на безпеку морських перевезень на водних шляхах України, слід також враховувати правила попередження зіткнення суден у морі (COLREG) та місцеві правила плавання. Існуюча реальна перспектива зростання вантажопотоку, що обслуговується річковим транспортом в Україні, потребує оцінки діючої системи сигналізації для досягнення максимального рівня безпеки на внутрішніх водних шляхах, беручи до уваги можливі несприятливі метеорологічні умови та батиметричні обмеження, що впливають на навігацію. Це безпосередньо пов'язано з перспективним проектом судноплавного маршруту Е-40, який розглядається в ЄС, як один із пріоритетних напрямків розвитку транспортних мереж в Європі. Проект передбачає з'єднання великих європейських водних шляхів між трьома морями: Північним, Чорним і Балтійським/Північним. Один з найбільших ділянок цього маршруту знаходиться на території України. Головне завдання сучасного судноплавства це - його безпека та ефективність. Знання слабких сторін і проблем існуючої системи ЗНЗ має першорядне значення для їх усунення за для поліпшення послуг, що надаються. Для досягнення цієї цілі, в роботі було проаналізоване фізичне розташування плавучих попереджувальних знаків та, дальність їх видимості, особливо при несприятливих умовах. Також були запропоновані рекомендації для вирішення виявлених проблем в існуючій системі ЗНЗ за для досягнення європейських стандартів рівня безпеки судноплавства.

Ключові слова: ЗНЗ, оцінка рівня безпеки, дальність видимості, судноплавство.

DOI: 10.33815/2313-4763.2020.2.23.006–014

Постановка задачі. Дослідження та аналіз розташування, а також дальність видимості наявних засобів навігаційного обладнання на ділянці ріки Дніпро, зокрема при несприятливих метеорологічних умовах, з точки зору безпеки судноплавства.

У завдання дослідження входили наступні задачі: з'ясування при якій метеорологічній дальності видимості ЗНЗ стають непомітними для ока спостерігача під час проходження судна по фарватеру; порівняння отриманих даних із вимогами до мінімальної дальності видимості вогню відповідно до рекомендацій МАМС; проведення аналізу рівня безпеки розташування навігаційних знаків; запропонування рішення для виявлених небезпечних ділянок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Міжнародна морська організація (ММО) [1] випускає стандарти безпеки, охорони та екології морських перевезень, заохочуючи інновації та ефективність їх використання. У цій області ММО співпрацює, з Міжнародною асоціацією морських засобів навігації та маячних служб (МАМС) [2], некомерційною технічною організацією, яка прагне привести у відповідність вимоги безпеки засобів навігаційного обладнання (ЗНЗ) у всьому світі, з урахуванням потреб моряків, використовуючи сучасні технології. Задля забезпечення максимального рівня безпеки та ефективності морської навігації, МАМС публікує рекомендації та керівні вказівки по використанню допоміжних систем, що поліпшують морські операції, такі як служби управління рухом суден (VTS) і системи автоматичної ідентифікації (AIS) [3].

У роботах [4–9] були детально розглянуті типи та характеристики ЗНЗ, місця їх розташування, відповідно до наявних небезпек та правил плавання.

В роботі [10] описуються існуючі дизайни ЗНЗ, досліджено які топові фігури та колір вогню найкращим чином видно для ока спостерігача.

Для визначення небезпечної ділянки на річці Дніпро були розглянуті дисертаційні матеріали [11].

У роботах [12–13] описуються розрахунки дальності видимості предметів в залежності від метеорологічних умов.

Були розглянуті роботи та вимоги МАМС [14–18] щодо застосування сучасних технологій е-Навігації, таких як віртуальні ЗНЗ в наступних країнах: Франція, Ірландія, Італія, Корея.

Мета дослідження – аналіз та надання відповідної оцінки засобам навігаційного обладнання на прикладі небезпечної ділянки ріки Дніпро задля підвищення рівня безпеки судноплавства, а також розробка рекомендацій для вдосконалення існуючої системи ЗНЗ.

Викладення основного матеріалу дослідження. Незалежно від зміни місцеперебування судна щодо навігаційного знаку або вогню, їх характеристики повинні залишатися незмінними. Основною вимогою, що пред'являється до навігаційного облаштування, є забезпечення гарної видимості всіх ЗНЗ відповідного призначення як в денний, так і в нічний час. Однак, в морській практиці зустрічаються ситуації, зокрема, при несприятливих метеорологічних умовах, таких як туман, коли обмежена видимість навігаційного огорожувального знаку може призводити до несприятливих наслідків, як для судна так і для навколишнього середовища.

В якості прикладу розглянемо небезпечну для судноплавства ділянку, яка знаходиться між греблею Дніпровської ГЕС і селищем Біленьке. На обраній ділянці існують наступні небезпеки: обмежена видимість та недостатня глибина, підводні скелі, пороги, мілини, кам'янисте дно, судові прогони під мостами, а також міст, що будується.

Для того щоб дослідити безпеку розташування ЗНЗ, необхідно зробити огляд характеристик, які є стандартизованими для всіх держав-членів МАМС.

Однією з найбільш важливих характеристик світлового сигналу є його дальність видимості, яка вказує максимальну відстань, де сприймається світло від буя. В навігації використовується світловий діапазон D в метрах, який визначається як максимальна гарантована відстань виявлення світлового променя з урахуванням метеорологічної видимості V і освітленості E , необхідної для ока спостерігача:

$$D = \left(\frac{V}{10} \times NR \right) + 1. \quad (1)$$

Номінальною дальністю дії вогню NR є максимальна відстань, на якій вогонь може бути видно при метеорологічній видимості, значенням у 10 морських миль.

Метеорологічною оптичною дальністю видимості називають відстань через атмосферу, яка потрібна для 95%-ого ослаблення світлового потоку променя, що йде при використанні кольорової температури джерела світла, що дорівнює 2700° К. Метеорологічна оптична дальність видимості пов'язана з прозорістю атмосфери наступною залежністю [19]:

$$V = d \log 0,05 / \log T_M. \quad (2)$$

Введення деяких фотометричних величин необхідно для визначення освітленості. З квантової точки зору світло характеризується потужністю W у ватах, яка є функцією його власної довжини хвилі λ , тобто, добуток потужності на функцію коефіцієнта видимості V_f , що виражає фактичне сприйняття світла людським оком, який дає світловий потік Φ , як зазначено в рівнянні (1):

$$\Phi = V(f) * W(f). \quad (3)$$

Іншими словами світловий потік це величина, що вимірюється кількістю енергії, яку випромінює джерело світла за одиницю часу:

$$\Phi = \frac{E}{t}. \quad (4)$$

У квантовій механіці коефіцієнт прозорості T_M визначається наступною формулою [20]:

$$T_M = \exp 2i \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{2m(\varepsilon - U)} dx, \quad (5)$$

де x_1 і x_2 – точки повороту, в яких повна енергія ε стає рівною потенційної, а імпульс частинки рівним нулю.

Сила світла I (вимірюється в одиницях сили світла – канделах) являє собою величину потоку, виміряну в певному напрямку та розраховується як відношення між світловим потоком Φ і кутом випромінювання ω :

$$I = d\Phi / d\omega. \quad (6)$$

Величина, яка вимірюється кількістю енергії, яка подається на одиницю поверхні тіла A за одну секунду, називається освітленістю, вимірюється в люксах [21]:

$$E = d\Phi / dA. \quad (7)$$

Освітленість E може бути виражена як функція метеорологічної дальності видимості V і відстані до спостерігача d згідно з законом Алларда [22]:

$$E(d) = \frac{I \times T_m^d}{d^2}, \quad (8)$$

$$I = (3.43 \times 10^6) E_T D^2 0.05^{\frac{d}{v}}. \quad (9)$$

З рівняння (9) можна оцінити світловий діапазон сигналу D , який також можна отримати за допомогою діаграми, наданої МАМС (рис. 1.).

Ця діаграма дозволяє мореплавцю визначати приблизну дальність світла вогню, коли відомі номінальна дальність і переважна метеорологічна видимість.

Для перевірки ефективності AtoN в умовах поганої видимості, необхідно зробити теоретичний аналіз, заснований на критеріях IALA. Середня відстань між кожним AtoN d і їх номінальним діапазоном D_N відомо, тому розрахуємо інтенсивність, створювану кожним сигналом, використовуючи значення освітленості, згідно з критеріями IALA [23]:

$$E_r = 2 \times 10^{-7} \text{ lx} - \text{у нічний час доби};$$

$$E_r = 1 \times 10^{-3} \text{ lx} - \text{у денний час доби}.$$

Виходячи з вищесказаного, введемо фактичну освітленість, створювану кожним ЗНЗ, як в рівнянні (8), в трьох різних умовах видимості: хороша, середня і погана. Необхідно перевірити ефективну видимість ЗНЗ з використанням нерівності:

$$E_d > E_T.$$

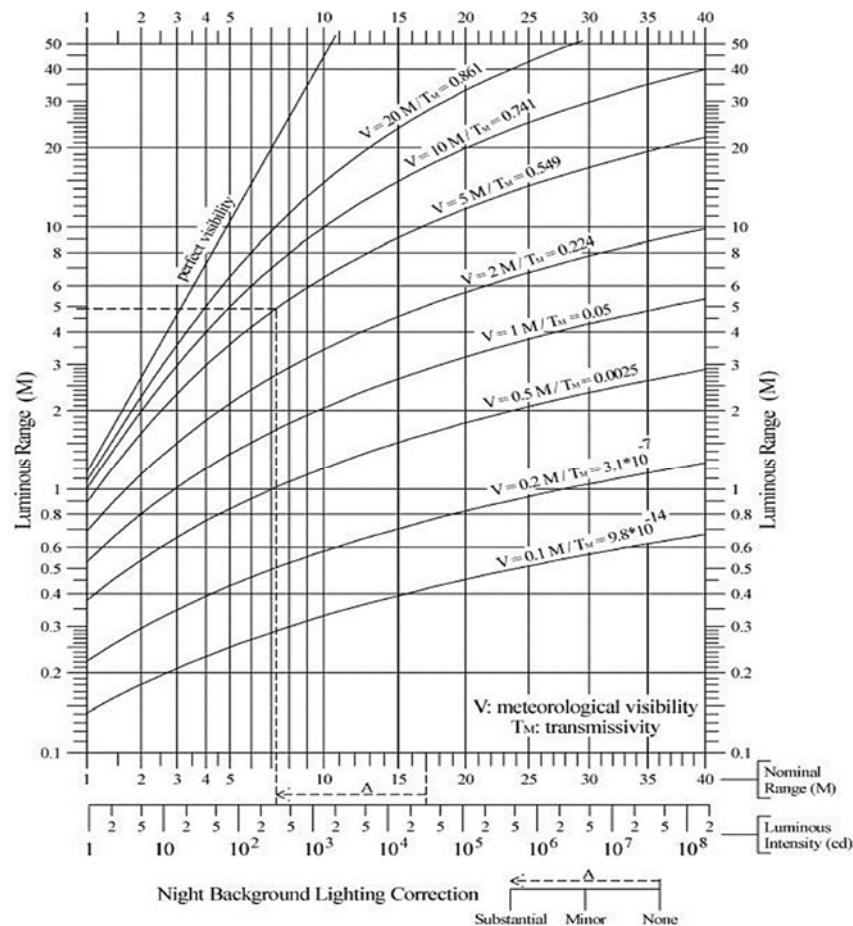


Рисунок 1 – Світловий і номінальний діапазон в нічну добу (графік заснований на освітленості $E_r = 2 \times 10^{-7}$ lx)

Освітленість плавучого знаку, при прийнятому коефіцієнті прозорості атмосфери T_m , повинна бути більше або дорівнювати мінімальній дальності виявлення знаку судноводієм.

Були проведені розрахунки, які вказують на потенційно небезпечні ділянки при проходженні фарватеру, де вогні буїв при відповідній прозорості атмосфери мало видимі для спостерігача. Отримані дані зведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Потенційно небезпечні ділянки для навігації в фарватері.

№ buoy	V [km]	D [km]	I [cd]	NR [km]	d [km]	E (d) [lx]	E_T [lx]
«114»–«114a» r	0,37	0,57	9	4	1,6483	$6,2 \times 10^{-11}$	2×10^{-7}
«114a»–«116» r	0,37	0,57	9	4	1,7594	$1,03 \times 10^{-11}$	2×10^{-7}
«118»–«120» r	0,37	0,57	9	4	1,852	$2,3 \times 10^{-12}$	2×10^{-7}
«128»–«130» r	0,37	0,57	9	4	1,0762	$7,7 \times 10^{-7}$	2×10^{-7}
«149»–«151» g	0,37	0,57	9	4	1,2038	$9,7 \times 10^{-8}$	2×10^{-7}
«153»–«157» g	0,37	0,57	9	4	1,6668	$5,1 \times 10^{-11}$	2×10^{-7}
«157»–«161» g	0,37	0,57	9	4	2,4632	$1,4 \times 10^{-16}$	2×10^{-7}
«163»–«165» g	0,37	0,57	9	4	1,6112	$1,1 \times 10^{-10}$	2×10^{-7}
«167»–«169» g	0,37	0,57	9	4	1,2964	$2,2 \times 10^{-8}$	2×10^{-7}

Результати є ефективними у всіх ситуаціях, за винятком ситуацій із поганою видимістю, що робить систему недостатньо релевантною щодо забезпечення відповідного рівня безпеки.

Було прийнято рішення, що для розв'язання цієї проблеми, необхідно використовувати віртуальні засоби навігаційного обладнання на ділянках, де видимість буїв обмежена при поганих метеорологічних умовах. На рис. 2 можна побачити приклад розташування віртуального ЗНЗ між буями «114а» та «116». Як показали розрахунки, при поганих метеорологічних умовах, вибрані ЗНЗ не помітні для ока спостерігача, тому між ними слід розмістити віртуальний буй (V-AIS), який забезпечить достатню їх видимість і підвищить рівень безпеки.

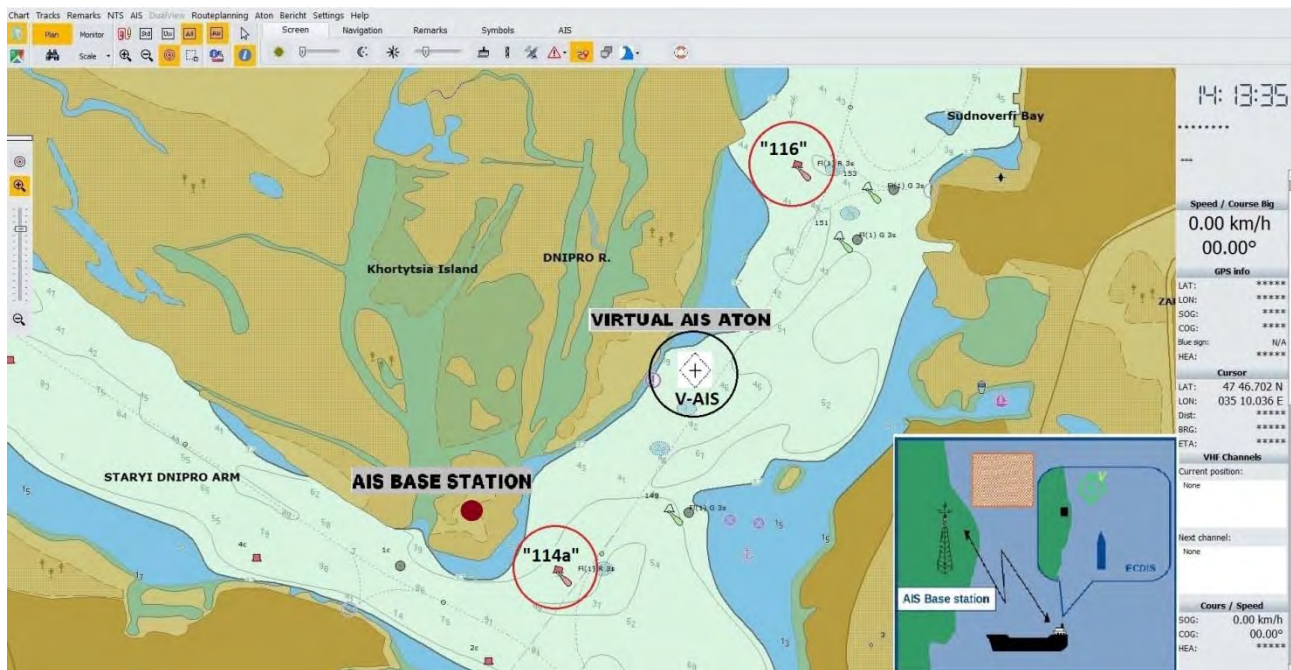


Рисунок 2 – Розташування віртуального ЗНЗ у зоні покриття АІС станції

Для реалізації обраного методу, необхідно вирішити проблему розбіжності зображення на радарі зі зображенням на електронній карті. Це пов'язано з тим, що віртуальні АІС ЗНЗ прив'язані до ECDIS, однак під час навігації, згідно з хорошою морською практикою, при виборі безпечного шляху судноводії повинні віддавати перевагу інформації з радара.

Розрахунки та методологія по найкращому встановленні віртуальних та синтетичних ЗНЗ будуть представлені у наступних дослідженнях. Розробка та впровадження автоматизованої системи моніторингу та дистанційного керування ЗНЗ на річкових судноплавних шляхах України з засобами електронної навігації поліпшать надійність роботи загальної системи навігаційно-гідрографічного забезпечення та зменшать експлуатаційні витрати на її обслуговування.

Висновки. Ефективна видимість сигналів була перевірена з використанням теоретичних досліджень, викладених в Рекомендаціях МАМС Е-200-2. Отримані дані показали, що, хоча і відповідають вимогам безпеки, вогонь кожного ЗНЗ не завжди може забезпечити їх видимість. При проходженні річки Дніпро, часто судноводії стикаються з проблемою ЗНЗсу фізичних ЗНЗ, таким чином, наражаючи себе на небезпеку сісти на міліну.

Після аналізу різних інструментів, найбільш ефективним рішенням при зростаючому розвитку концепції електронної навігації та пов'язаних з нею технологій, є АІС як найнадійніший та універсальний засіб для розсилання інформації всім підрозділам у робочій зоні, який забезпечує активне обслуговування в будь-якій ситуації.

Були розроблені рекомендації та завдання, які необхідно виконати для досягнення поставленої мети:

- 1) виявлення та усунення «мертвих зон» на водному шляху;
 - 2) розширення прибережної мережі АІС;
 - 3) збільшення мережі передачі диференціальних поправок засобами АІС з використанням УКХ;
 - 4) організація технічної підготовки й освоєння диспетчерським персоналом всіх можливостей базових станцій АІС;
 - 5) інтеграція АІС з системою суднових повідомлень;
 - 6) повне покриття УКХ-зв'язку на ВВШ України;
 - 7) заміна старого навігаційне обладнання на судах, які насамперед перевозять небезпечні вантажі та пасажирів;
 - 8) видання закону, який зобов'язує використовувати транспондер за стандартами Tracking and Tracing розроблений Європейським РІС;
 - 9) вирішення проблеми розбіжності зображення на радарі із зображенням на карті.
- Такий підхід дозволить значно підвищити рівень безпеки судноплавства, і також введе додаткові активні елементи контролю при плаванні в небезпечних зонах ВВШ України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Міжнародна морська організація (ІМО). *Міністерство інфраструктури України : офіційний сайт*. URL : <https://mtu.gov.ua/content/mizhnarodna-morska-organizaciya-imo.html>
2. Керівництво IALA-MAMC з навігаційного забезпечення мореплавства : керівництво IALA-MAMC «IALA NAVGUIDE». *Держгеографія : офіційний сайт*. URL : https://hydro.gov.ua/dl/iala/ua/navguide_2006_final_version.pdf
3. R1001 – The IALA maritime buoyage system. *IALA : official website*. URL : <https://www.iala-aism.org/product/r1001-iala-maritime-buoyage-system/>
4. Средства навигационного оборудования (СНО). *Корабельний портал*. URL : [http://korabley.net/news/sredstva_navigacionnogo_oborudovanija_sno/2010-08-09-624#:~:text=Средствами%20навигационного%20оборудования%20морей%20\(СНО,канало%20в%20фарватеров%20и%20навигационных%20опасностей](http://korabley.net/news/sredstva_navigacionnogo_oborudovanija_sno/2010-08-09-624#:~:text=Средствами%20навигационного%20оборудования%20морей%20(СНО,канало%20в%20фарватеров%20и%20навигационных%20опасностей)
5. Средства навигационного оборудования. *Морской интернет-клуб «Кубрик»*. URL : <http://www.randewy.ru/nav/nav9.html>
6. Навигационное оборудование морских путей. *Морское агентство «Транс-Сервис» : официальный сайт*. URL : https://www.trans-service.org/ru.php?section=info&page=navi&subpage=locia_02
7. Aids to Navigation. *Boat U.S. Foundation : official website*. URL : <https://www.boatus.org/study-guide/navigation/aids/>
8. Aids to Navigation Buoyage Systems (Unit 35). *Pomorski fakultet of Maritime studies university of Rijeka : electronic journal*. URL : <https://www.pfri.uniri.hr/bopri/documents/35-ME-tal.pdf>
9. Средства навигационного оборудования (§73). *Flot.com : интернет портал*. URL : <https://flot.com/publications/books/shelf/shipnavigation/75.htm?print=Y>
10. Aids to Navigation Guideline. *Maritime New Zealand : website*. URL : <https://www.maritimenz.govt.nz/commercial/ports-and-harbours/documents/Aids-to-navigation-guidelines.pdf>
11. Прохоренков А. А. Комбинированный метод оценки навигационной безопасности плавания по внутренним водным путям : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня к.т.н. : 05.13.06. Санкт-Петербург, 2012. 27 с.
12. Дальность видимости предметов (§11). *Flot.com : интернет портал*. URL: <https://flot.com/publications/books/shelf/shipnavigation/13.htm>

13. Дальность видимости (§5). *Flot.com* : интернет портал. URL : <https://flot.com/publications/books/shelf/rulkov/6.htm>
 14. IALA. *The IALA. Maritime Buoyage System*. IALA; St Germain en Laye, France, 2017. Recommendation R1001, Ed. 1.0.
 15. IALA. *Marine Signal Lights Part 2–Calculation, Definition and Notation of Luminous Range*. IALA; St Germain en Laye, France, 2008. Recommendation E-200-2, Ed. 1.
 16. Rigg Bank Virtual AtoN. *Commissioner of Irish Lights Navigation and Maritime Services*. URL : <https://www.irishlights.ie/misc/rigg-bank-virtual-aid-to-navigation.aspx>.
 17. Di Ciaccio F., Menegazzo P., Troisi S. Optimization of the Maritime Signaling in the Venetian Lagoon. *Proceedings of the 2018 IEEE International Workshop on Metrology for the Sea : IEEE International Conference on Communications*, October 2018. Bari, Italy, 2018. P. 8–10.
 18. Nguyen T. X., Park Y. S., Smith M. V., Aydogdu V., Jung C. H. A Comparison of ES and PARK Maritime Traffic Risk Assessment Models in a Korean Waterway. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*. 2015. Vol. 21 No. 3. P. 246–252.
 19. МАМС РНО 2006. Морські засоби навігаційного обладнання та маякові служби. Франція : Видання Міжнародної Асоціації, 2006. 190 с. (Інформація та документація).
 20. Уйманов И. В. Физика электронных и ионных процессов : лекционные методические разработки. *StudFiles* : *electronic journal*. URL : <https://studfile.net/preview/1869717/page:5/>.
 21. Единица силы света и другие характеристики. *Solo-project.com* : *electronic journal*. URL : <http://solo-project.com/articles/10/edinica-sily-sveta-i-drugie-harakteristiki.html>
 22. Дальность видимости огней. Закон Алларда. *StudFiles* : *electronic journal*. URL : <https://studfile.net/preview/14536705/page:6/>.
- R0202 Marine Signal Lights – Calculation, Definition and Notation of Luminous Range(E-200-2). *IALA* : *official website*. URL : <https://www.iala-aism.org/product/marine-signal-lights-part-2-calculation-definition-and-notation-of-luminous-range-200/>

REFERENCES

1. Mizhnarodna morskа orhanizatsiia (IMO). *Ministerstvo infrastruktury Ukrainy*. Retrieved from <https://mtu.gov.ua/content/mizhnarodna-morska-organizaciya-imo.html>
2. Kerivnytstvo IALA-MAMS z navihatsiinoho zabezpechennia moreplavstva : kerivnytstvo IALA-MAMS «IALA NAVGUIDE». *Derzhheohrafiia*. Retrieved from https://hydro.gov.ua/dl/iala/ua/navguide_2006_final_version.pdf
3. R1001 – The IALA maritime buoyage system. *IALA* : *official website*. Retrieved from <https://www.iala-aism.org/product/r1001-iala-maritime-buoyage-system/>
4. Sredstva navigacionnogo oborudovaniya (SNO). *Korabeljnihyj portal*. Retrieved from [http://korabley.net/news/sredstva_navigacionnogo_oborudovaniya_sno/2010-08-09-624#:~:text=Средствами%20навигационного%20оборудования%20морей%20\(СНО,каналов%20фарватеров%20и%20навигационных%20опасностей](http://korabley.net/news/sredstva_navigacionnogo_oborudovaniya_sno/2010-08-09-624#:~:text=Средствами%20навигационного%20оборудования%20морей%20(СНО,каналов%20фарватеров%20и%20навигационных%20опасностей)
5. Sredstva navigacionnogo oborudovaniya. *Morskoyj internet-klub «Kubrik»*. Retrieved from <http://www.randewy.ru/nav/nav9.html>
6. Navigacionnoe oborudovanie morskikh putej. *Morskoe agenstvo «Trans-Servis»* : *official website*. Retrieved from https://www.trans-service.org/ru.php?section=info&page=navi&subpage=locia_02
7. Aids to Navigation. *Boat U.S. Foundation* : *official website*. Retrieved from <https://www.boatus.org/study-guide/navigation/aids/>
8. Aids to Navigation Buoyage Systems (Unit 35). *Pomorski fakultet of Maritime studies university of Rijeka* : *electronic journal*. Retrieved from <https://www.pfri.uniri.hr/bopri/documents/35-ME-tal.pdf>
9. Sredstva navigacionnogo oborudovaniya (§73). *Flot.com* : *webportal*. Retrieved from <https://flot.com/publications/books/shelf/shipnavigation/75.htm?print=Y>

10. Aids to Navigation Guideline. *Maritime New Zealand : website*. Retrieved from <https://www.maritimenz.govt.nz/commercial/ports-and-harbours/documents/Aids-to-navigation-guidelines.pdf>
11. Prokhorenkov, A. A. (2012). Kombinirovanniyj metod ocenki navigacionnoy bezopasnosti plavaniya po vnutrennim vodnim putyam : *Extended abstract of candidate's thesis*. Sankt-Peterburg.
12. Daljnostj vidimosti predmetov (§11). *Flot.com : webportal*. Retrieved from <https://flot.com/publications/books/shelf/shipnavigation/13.htm>
13. Daljnostj vidimosti (§5). *Flot.com : webportal*. Retrieved from <https://flot.com/publications/books/shelf/rulkov/6.htm>
14. IALA. The IALA. *Maritime Buoyage System*. IALA; St Germain en Laye, France, 2017. Recommendation R1001, Ed. 1.0.
15. IALA. *Marine Signal Lights Part 2—Calculation, Definition and Notation of Luminous Range*. IALA; St Germain en Laye, France, 2008. Recommendation E-200-2, Ed. 1.
16. Rigg Bank Virtual AtoN. *Commisionerf of Irish Lights Navigation and Maritime Services*. Retrieved from <https://www.irishlights.ie/misc/rigg-bank-virtual-aid-to-navigation.aspx>.
17. Di Ciaccio F., Menegazzo P., Troisi S. (2018). Optimization of the Maritime Signaling in the Venetian Lagoon. *Proceedings of the 2018 IEEE International Workshop on Metrology for the Sea : IEEE International Conference on Communications*. Bari, Italy.
18. Nguyen T. X., Park Y. S., Smith M. V., Aydogdu V., Jung C. H. (2015). A Comparison of ES and PARK Maritime Traffic Risk Assessment Models in a Korean Waterway. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 21 No. 3*, 246–252.
19. MAMS RNO 2006. Morski zasoby navihatsiinoho obladnannia ta maiakovi sluzhby. Frantsiia : Vydannia Mizhnarodnoi Asotsiatsii, 2006.
20. Uyjmanov I. V. Fizika ehlektronnikh i ionnikh processov : lekcionnihe metodicheskie razrabotki. *StudFiles : electronic journal*. Retrieved from <https://studfile.net/preview/1869717/page/5/>.
21. Edinica silih sveta i drugie kharakteristiki. *Solo-project.com : electronic journal*. URL : <http://solo-project.com/articles/10/edinica-sily-sveta-i-drugie-harakteristiki.html>
22. Daljnostj vidimosti ogneyj. Zakon Allarda. *StudFiles : electronic journal*. Retrieved from <https://studfile.net/preview/14536705/page/6/>.
23. R0202 Marine Signal Lights – Calculation, Definition and Notation of Luminous Range(E-200-2). *IALA : official website*. Retrieved from <https://www.iala-aism.org/product/marine-signal-lights-part-2-calculation-definition-and-notation-of-luminous-range-200/>

Гладких И. И., Голиков А. А., Олейник Ю. А. ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ СРЕДСТВ НАВИГАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ НА ОПАСНЫХ УЧАСТКАХ РЕКИ ДНЕПР

Модернизация портов и фарватеров, а также последние достижения науки в развитии новых технологий и растущий спрос на навигационные услуги делают необходимым динамическую модернизацию и усиление систем средств навигационного обеспечения (СНО). Размещение СНО непосредственно влияет на безопасность морских перевозок на водных путях Украины, следует также учитывать правила предупреждения столкновения судов в море (COLREG) и местные правила плавания. Существующая реальная перспектива роста грузопотока, обслуживаемого речным транспортом в Украине, требует оценки действующей системы сигнализации для достижения максимального уровня безопасности на внутренних водных путях, учитывая возможные неблагоприятные метеорологические условия и Батиметрические ограничения, влияющие на навигацию. Это напрямую связано с перспективным проектом судоходного маршрута E-40, который рассматривается в ЕС, как одно из приоритетных направлений развития транспортных сетей в Европе. Проект предусматривает соединение крупных европейских водных путей между тремя морями: Северным, Черным и Балтийским / Северным. Один из крупнейших участков этого маршрута находится на территории Украины. Главная задача современного судоходства это - его безопасность и эффективность. Знание слабых сторон и проблем существующей системы СНО имеет первостепенное значение для их устранения с для улучшения услуг. Для достижения этой цели, в работе было проанализировано физическое расположение плавучих предупредительных знаков и, дальность их видимости, особенно при неблагоприятных

условиях. Также были предложены рекомендации для решения выявленных проблем в существующей системе СНО по для достижения европейских стандартов уровня безопасности судоходства.

Ключевые слова: СНО, оценка уровня безопасности, дальность видимости, судоходство.

Gladkykh I. I., Golikov A. A., Oleynik J. A. ASSESSMENT OF THE ATON'S CONDITION IN DANGEROUS SECTION OF THE DNIEPER RIVER

Due to modernization of ports and fairways, as well as the development of new technologies and growing demand for navigation services make it necessary to dynamically modernize and enhance Aids to Navigation System. The safety level of maritime transport on the inland waterways in Ukraine directly depends on AtoNs location, take into account the rules for preventing collision of ships at sea (COLREG) and local navigation rules. It is necessary to make assessment of the AtoN Signalization System by reason of growing perspectives and increasing of cargo traffic in Ukraine for achievement maximum safety level in inland waterways taken into account possibility of bad weather condition and bathymetric constraints which effect on navigation. It is directly related to the perspective project – E-40 shipping route, which is considered in the EU as one of the priority direction of the development of transport networks in Europe. The project envisages the connection of major European waterways between three seas: the North, the Black and the Baltic / North. One of the largest sections of this route is located in Ukraine. The main task of modern shipping is its safety and efficiency. Knowing the weaknesses and problems of the existing AtoN System have paramount importance for elimination them and for improving services. To achieve this goal, it was analyzed the physical location of floating warning signs and the range of their visibility, especially during bad conditions. Recommendations were also offered for solving the identifying problems in the existing AtoN system in order to achieve European standards of navigation safety.

Keywords: AtoN, assessment of the safety level, visibility, navigation.

© Гладких І. І., Голіков А. О., Олійник Ю. А.

Статтю прийнято
до редакції 18.11.20

ПРО РУХ РЯТУВАЛЬНОЇ ШЛЮПКИ ВІЛЬНОГО ПАДІННЯ ПРИ СХОДЖЕННІ З ПОХИЛОЇ РАМПИ

Горалик Є. Т., к.т.н., доцент, завідувач кафедри природничо-технічного забезпечення діяльності водного транспорту Державного інституту інфраструктури та технологій, e-mail: et_gor@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2399-5373;

Крюков М. М., д.т.н., професор кафедри вищої та прикладної математики, Державного інституту інфраструктури та технологій, e-mail: mmkryukov@ukr.net, ORCID: 0000-8156-1720

Розглядається задача про рух рятувальної шлюпки вільного падіння, яка моделюється однорідним стрижнем, при сходженні з похилої рампи. Мета дослідження полягає в розробці та використанні адекватної математичної моделі для дослідження параметрів руху рятувальної шлюпки вільного падіння при сходженні з нахиленої під кутом 35° рампи для дослідження впливу початкової швидкості та довжини шлюпки на її швидкість, кутову швидкість та кут тангажу протягом першої фази падіння. Отримано розв'язувальну систему звичайних диференціальних рівнянь і сформульовано відповідну задачу Коші, яка розв'язується чисельно за допомогою методу Рунге-Кутта. Диференціальні рівняння руху стрижня складені за допомогою рівнянь Лагранжа другого роду. Запропонований підхід дозволяє за допомогою чисельних експериментів проводити раціональний вибір параметрів руху РШВП, що сходять з похилої рампи. На основі отриманих результатів в подальших дослідженнях слід з'ясувати вплив кута нахилу рампи і розташування центру мас шлюпки на параметри її руху на початку вільного падіння.

Ключові слова: плоско-паралельний рух, стрижень, похила рампа, рівняння Лагранжа другого роду, звичайні диференціальні рівняння, задача Коші, чисельне моделювання, метод Рунге-Кутта.

DOI: 10.33815/2313-4763.2020.2.23.015–027

Постановка проблеми. Рух рятувальної шлюпки вільного падіння (РШВП) по похилій рампі, відрив від рампи і вільне падіння по балістичній траєкторії, занурення і наступне виринання на поверхні моря взаємопов'язані. Величина небезпечних прискорень діючих на РШВП і розміщених в ній людей залежить від швидкості і орієнтації шлюпки в момент контакту її носового кінця з поверхнею води, які визначаються попередніми етапами руху. Найбільш цікавим і складним для дослідження з цих етапів є фаза падіння з наростаючим кутом нахилу – з моменту, коли центр мас шлюпки опиняється над краєм опори (крайнім роликотом рампи) до моменту сходу з рампи кінця опорних поверхонь шлюпки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Рятувальні шлюпки вільного падіння є найбільш надійним рятувальним засобом, який забезпечує евакуацію людей з аварійного судна практично при будь-яких погодних умовах. Вони мають дві суттєві переваги: більш надійні при спуску з аварійного судна, яке має великий крен або диферент та при сильній хитаючи; після скидання з корми судна, здатні швидко віддалитися від місця катастрофи на безпечну відстань.

Сьогодні в світі вже більшість сучасних морських вантажних суден та танкерів обладнані РШВП. Актуальним є їх розробка і встановлення в майбутньому і на пасажирських суднах. РШВП обладнані також сучасні морські нафтодобувні платформи.

Історія створення рятувальної шлюпки вільного падіння нерозривно пов'язана з скандинавськими країнами. Концепція такої шлюпки вперше з'явилась на світ у 1897 році [1] коли шведський конструктор А.Е. Фальк запатентував конструкцію закритої рятувальної шлюпки, яка зісковзувала з корми судна. Але знадобилося ще 80 років технічного розвитку для того, щоб у 1977 році відбувся перший пілотований спуск рятувальної шлюпки вільного падіння по балістичній траєкторії з морського судна на верфі Oresundsavarvet (Ересунн Швеція).

Подальший розвиток ідея застосування рятувальних засобів, які спускаються на воду шляхом скидання, отримала під час виконання затвердженої норвезьким парламентом

програми дослідження перспективного обладнання і методів спасіння людей на морі (1977-1983) [2].

Відтоді і по сьогодні роботи по вдосконаленню та розробці нових конструкцій та технологій РШВП тривають зусиллями багатьох країн. При цьому норвежці продовжують зберігати лідерство в цих розробках. Так інженери норвезької компанії «Norsafe AS», яка спеціалізується на рятувальній техніці, розробляють рятувальний засіб майбутнього «ResCube» – систему морських РШВП, розташованих вертикально вздовж бортів пасажирського судна, завдяки чому пасажирів можуть увійти відразу з шести палуб [3]. «ResCube» дозволяє розмістити на борту 330 пасажирів. Під час рятувальної операції під дією сили тяжіння система повертається на 90 градусів. Вага рятувальної шлюпки складає понад 50 тонн. Компанія Norsafe у 2015 році встановила новий світовий рекорд по висоті падіння шлюпки з пасажиром [4]. Шлюпка *GES50 MKIII*, розрахована на 70 пасажирів, була скинута з висоти 40 м, коли на борту знаходилось 10 чоловік. Трохи раніше (у вересні 2013 року) Norsafe успішно скинула шлюпку *GES52* без пасажирів з рекордної висоти 66,8 м.

Роботи по розробці РШВП в СРСР та СНГ [2] тривали з 1984 по 1994 рік за участю ЦНДІ Морського флоту та ЦКБ «Редан». Шляхом експериментів на моделях була визначена оптимальна форма корпусу, розроблена конструкція, виготовлений і випробуваний у 1993 році дослідний зразок, який підтвердив його відповідність вимогам: перевантаження не перевищували шестикратних, спуско-підйомний пристрій (СПП) для скидання РШВП по балістичній траєкторії виготовлений миколаївським ПКБ «Прогрес» забезпечував усі параметри скидання.

Для вирішення проблем пов'язаних з перевантаженнями при входженні у воду при розробці нових РШВП, крім експериментів, важливими є теоретичні дослідження руху шлюпки при скиданні з спуско-підйомного пристрою. На жаль, відкриті публікації, які відносяться до розрахункових і експериментальних робіт, пов'язаних з дослідженнями динаміки руху РШВП при аварійному скиданні відсутні. В монографії [5] є лише згадки про РШВП та їх конструктивні особливості в порівнянні з традиційними рятувальними шлюпками. Міжнародна конвенція SOLAS – 74 [6] вкрай лаконічно формулює вимоги до РШВП: «Рятувальна шлюпка, призначена для спуску методом вільного падіння, повинна мати таку конструкцію, щоб, будучи завантаженою повним комплектом людей і спорядження, вона забезпечувала захист від небезпечних прискорень, які виникають при спусканні її на воду з висоти, щонайменше рівній максимальній проектній висоті її встановлення над ватерлінією при найменшій експлуатаційній осадці судна, несприятливих умовах диферента до 10° і крені не менше 20° на будь-який борт. Деякі технічні характеристики РШВП містяться в [7-10].

В роботі [11] приведена математична модель процесу падіння ШСП, але дані конкретних розрахунків не наводяться. Коротко розглянуті етапи (фази) руху ШСП в роботі [12] і запропоновані залежності для визначення основних параметрів (лінійних і кутових швидкостей, кутів тангажу тощо). В роботі [13] пропонується алгоритм для визначення параметрів руху і орієнтації РШВП перед приводненням після скидання з аварійного судна, однак відсутні порівняння результатів розрахунку за цим алгоритмом з більш точними розрахунками або даними експериментів.

В останній роботі пропонується схема руху РШВП представлена на рис. 1 до контакту з водою, яка складається з трьох послідовних етапів:

- 1) розгін РШВП по похилій рампі до суміщення її центру мас з крайніми (нижніми) роликми рампи;
- 2) продовження прискореного переміщення РШВП по рампі з наростаючим кутом нахилу (тангаж) аж до сходу її корми з крайніх роликів рампи (перша фаза падіння);
- 3) вільне падіння до моменту торкання носовим кінцем поверхні води (друга фаза падіння).

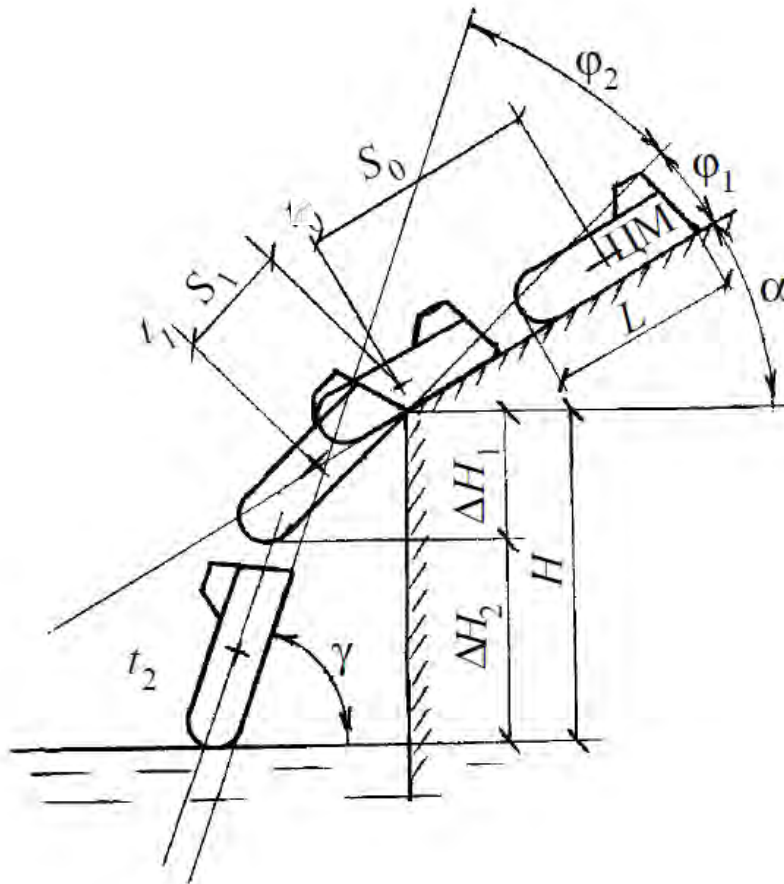


Рисунок 1 – Схема руху РШВП до контакту з водою

Мета дослідження полягає в розробці та використанні адекватної математичної моделі для дослідження параметрів руху рятувальної шлюпки вільного падіння при сходженні з нахиленої під кутом 35° рампи для дослідження впливу початкової швидкості та довжини шлюпки на її швидкість, кутову швидкість та кут тангажу протягом першої фази падіння.

Результати дослідження. Найбільш складним і малодослідженим етапом руху рятувальної шлюпки вільного падіння при її сходженні з напрямних опорної рампи є перша фаза падіння з наростаючим кутом нахилу з моменту, коли центр мас опиняється над краєм опори (крайнім роликом рампи) до моменту сходу з рампи опорних поверхонь шлюпки

Рятувальні шлюпки вільного падіння, які використовуються на морських судах та нафтодобувних платформах, при сходженні з похилої рампи та подальшому вільному падінні до поверхні води рухаються плоско-паралельно.

При дослідженні плоско-паралельного руху тіл в теоретичній механіці його зазвичай представляють як суму двох рухів: поступального разом з центром мас та обертального навколо цієї точки [14]. При цьому реальні тіла в багатьох випадках з достатньою точністю можуть моделюватися однорідним стрижнем.

В подальшому в даній роботі при дослідженні руху РШВП при сходженні з похилої рампи застосуємо полярну систему координат (r, φ) а в якості моделі будемо використовувати саме однорідний стрижень масою m довжиною L (рис. 2). В початковий момент центр мас стрижня знаходиться над крайнім роликом рампи і має початкову швидкість \vec{V}_0 напрямлену вздовж рампи вниз.

Переміщення центру мас стрижня за край опори на довжину відрізка $\vec{r} = O\vec{C}$ під дією сили тяжіння $\vec{P} = m\vec{g}$ викликає появу обертального моменту величиною

$M = P x = m g r \cos \varphi$, під дією якого стрижень обертається з кутовим прискоренням у вертикальній площині.

Для складання диференціальних рівнянь руху тіла застосуємо рівняння Лагранжа другого роду. При цьому силами тертя знехтуємо.

Рисунок 2 – Сходження однорідного стрижня з похилої опори

В якості узагальнених координат приймемо радіус $r = OC$ – відстань від центру мас стрижня до краю опори і полярний кут φ між горизонтальною віссю X і напрямком OC – віссю стрижня.

В даному випадку рівняння Лагранжа другого роду мають вигляд:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta T}{\delta \dot{r}} \right) - \frac{\delta T}{\delta r} = Q_1,$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta T}{\delta \dot{\varphi}} \right) - \frac{\delta T}{\delta \varphi} = Q_2,$$

де T – кінетична енергія тіла, $\dot{r} = \frac{dr}{dt}$ – модуль радіальної швидкості центру мас, $\dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt}$ –

модуль кутової швидкості стрижня, $\ddot{\varphi} = \frac{d^2\varphi}{dt^2}$ – модуль кутового прискорення стрижня, Q_1

і Q_2 – узагальнені сили.

Кінетична енергія стрижня при його русі визначається з виразу:

$$T = \frac{I_{zc} \dot{\varphi}^2}{2} + \frac{mV_c^2}{2},$$

де I_{zc} – момент інерції стрижня відносно центру мас, V_c – модуль вектора швидкості центру мас.

З урахуванням відомих формул для моменту інерції стрижня відносно центру мас

$$I_{zc} = \frac{mL^2}{12} \text{ і модуля вектора швидкості точки в полярній системі координат } V = \sqrt{\dot{r}^2 + r^2 \dot{\varphi}^2}$$

отримаємо наступний вираз для кінетичної енергії стрижня: $T = \frac{mL^2}{12} \cdot \frac{\dot{\varphi}^2}{2} + \frac{m(\dot{r}^2 + r^2 \dot{\varphi}^2)}{2}$.

Знайшовши вирази для похідних, що входять у ліві частини рівнянь Лагранжа, отримаємо:

$$\frac{\delta T}{\delta \dot{r}} = m\dot{r}; \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\delta T}{\delta \dot{r}} \right) = m\ddot{r}; \quad \frac{\delta T}{\delta r} = m r \dot{\varphi}^2; \quad \frac{\delta T}{\delta \dot{\varphi}} = \frac{L^2}{12} m \dot{\varphi} + m r^2 \dot{\varphi};$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta T}{\delta \dot{\varphi}} \right) = 2 m r \dot{\varphi} + \left(\frac{L^2}{12} + r^2 \right) m \ddot{\varphi}; \quad \frac{\delta T}{\delta \varphi} = 0.$$

Визначимо узагальнену силу Q_1 по координаті $q_1 = r$. Для цього розглянемо можливе переміщення системи, зумовлене можливим приростом узагальної координати δr (рис. 3).

Рисунок 3 – Можливе переміщення системи, зумовлене можливим приростом узагальної координати δr .

Сума елементарних робіт всіх активних сил, прикладених до системи на цьому переміщенні дорівнює: $\delta A = P \delta r \sin \varphi = m g \delta r \sin \varphi$.

З іншого боку $\delta A = Q_1 \delta q_1 = Q_1 \delta r$. Отже, $Q_1 = m g \sin \varphi$. Так само визначимо узагальнену силу Q_2 по координаті $q_2 = \varphi$.

Розглянемо можливе переміщення системи, зумовлене можливим приростом узагальної координати $\delta \varphi$ (рис. 4).

Сума елементарних робіт всіх активних сил, прикладених до системи на цьому переміщенні дорівнює $\delta A = P r [\sin(\varphi + \delta \varphi) - \sin \varphi] = m g r [\sin \varphi \cos \delta \varphi + \cos \varphi \sin \delta \varphi - \sin \varphi]$.

Оскільки $\cos \delta \varphi \approx 1$ і $\sin \delta \varphi \approx \delta \varphi$, можна записати $\delta A = m g r \cos \varphi \delta \varphi$. З іншого боку $\delta A = Q_2 \delta q_2 = Q_2 \delta \varphi$. Отже, $Q_2 = m g r \cos \varphi$.

Рисунок 4 – Можливе переміщення системи, зумовлене можливим приростом узагальної координати $\delta \varphi$.

Підставимо отримані вище вирази у рівняння Лагранжа і отримаємо наступну розв'язувальну систему диференціальних рівнянь другого порядку:

$$\begin{aligned} \ddot{r} - r\dot{\varphi}^2 &= g \sin \varphi ; \\ 2r\dot{r}\dot{\varphi} + \left(\frac{L^2}{12} + r^2\right)\ddot{\varphi} &= gr \cos \varphi . \end{aligned} \quad (1)$$

Для формулювання задачі Коші для отриманої системи диференціальних рівнянь (1) необхідно додати початкові умови:

$$r(0) = 0, \dot{r}(0) = v_0, \varphi(0) = \alpha, \dot{\varphi}(0) = 0. \quad (2)$$

Приведемо отриману систему диференціальних рівнянь до нормальної форми Коші:

$$\begin{aligned} \frac{dy_1}{dt} &= y_2, \\ \frac{dy_2}{dt} &= y_1 y_4^2 + g \sin y_3, \\ \frac{dy_3}{dt} &= y_4, \\ \frac{dy_4}{dt} &= \frac{g y_1 \cos y_3 - 2 y_1 y_2 y_4}{a + y_1^2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Тут $y_1 = r$, $y_2 = \dot{r}$, $y_3 = \varphi$, $y_4 = \dot{\varphi}$, $a = \frac{L^2}{12}$. Початкові умови мають вигляд:

$$y_1(0) = 0, y_2(0) = v_0, y_3(0) = \alpha, y_4(0) = 0. \quad (4)$$

Запишемо задачу Коші (3), (4) у векторній формі:

$$\frac{d\vec{Y}}{dt} = \vec{F}(t, \vec{Y}), \quad \vec{Y}(0) = \vec{Y}_0, \quad (5)$$

де $\vec{Y} = \{y_1, y_2, y_3, y_4\}^T$. Будемо розв'язувати задачу (5) за допомогою чисельного методу Рунге-Кутта четвертого порядку точності за схемою (Березин, Жидков, 1962):

$$\vec{Y}_{n+1} = \vec{Y}_n + \vec{\Lambda}_n, \quad (n = 0, 1, 2, \dots),$$

$$\text{де } \vec{\Lambda}_n = \frac{1}{6}(\vec{K}_1 + 2\vec{K}_2 + 2\vec{K}_3 + \vec{K}_4), \quad \vec{K}_1 = h\vec{F}(t_n, \vec{Y}_n), \quad \vec{K}_2 = h\vec{F}\left(t_n + \frac{h}{2}, \vec{Y}_n + \frac{\vec{K}_1}{2}\right),$$

$$\vec{K}_3 = h\vec{F}\left(t_n + \frac{h}{2}, \vec{Y}_n + \frac{\vec{K}_2}{2}\right), \quad \vec{K}_4 = h\vec{F}\left(t_n + h, \vec{Y}_n + \vec{K}_3\right), \quad t_n = nh \quad (n = 0, 1, 2, \dots), \quad h > 0 - \text{ крок в}$$

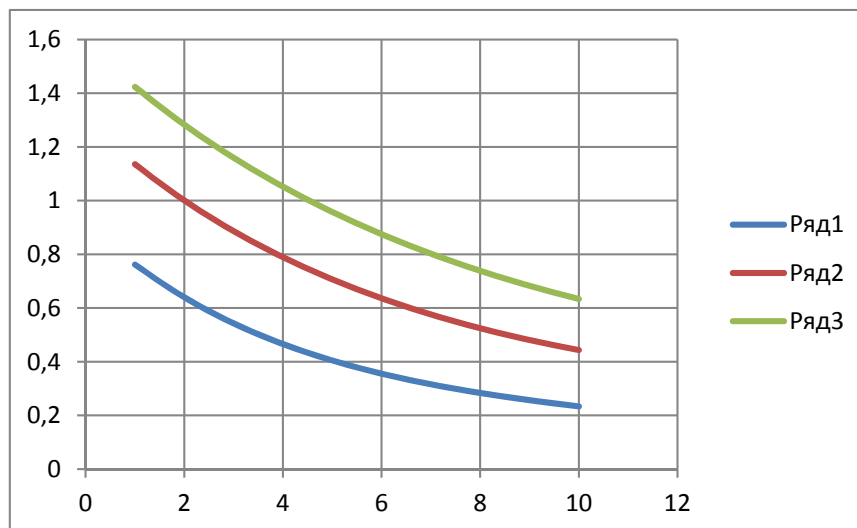
часі $\Delta t_n = t_{n+1} - t_n = h$.

На основі запропонованого підходу проведено серію чисельних експериментів для визначення часу скочування шлюпки, горизонтальної та вертикальної складової швидкості центру мас, кутів повороту та кутової швидкості шлюпки в момент відриву від рампи при значенні кута нахилу рампи $\alpha = 35^\circ$ та різних значеннях початкової швидкості центру мас в діапазоні від 1 до 10 м/с і довжини шлюпки в діапазоні від 5 до 15 м.

В табл. 1 та для більшої наочності на рис. 5–8 представлені результати розрахунків часу скочування шлюпки (першого етапу падіння), кута тангажу, кутової швидкості тангажу та модуля швидкості центру мас шлюпки в момент її відриву від рампи для шлюпок довжиною 5, 10 і 15 м при початкових швидкостях в діапазоні 1–10 м/с.

Таблиця 1 – Результати розрахунків часу скочування, кута тангажу, кутової швидкості тангажу та модуля швидкості центру мас в момент відриву шлюпки довжиною 5, 10 і 15 м при початкових швидкостях в діапазоні 1–10 м/с.

L=5 м										
V_0 , м/с	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t, с	0,762	0,64	0,543	0,466	0,405	0,356	0,316	0,284	0,257	0,234
$\varphi - 35^\circ$	14,873	12,006	9,312	7,191	5,586	4,382	3,522	2,834	2,376	1,975
$\dot{\varphi}$, c^{-1}	0,616	0,585	0,539	0,489	0,44	0,396	0,358	0,326	0,297	0,273
V_1 , м/с	5,944	6,083	6,39	6,851	7,435	8,112	8,857	9,654	10,489	11,352
L=10 м										
V_0 , м/с	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t, с	1,136	1,001	0,887	0,79	0,707	0,637	0,577	0,525	0,481	0,444
$\varphi - 35^\circ$	15,56	13,73	11,66	9,713	8,108	6,732	5,643	4,726	4,038	3,465
$\dot{\varphi}$, c^{-1}	0,439	0,428	0,41	0,387	0,362	0,337	0,313	0,29	0,27	0,252
V_1 , м/с	8,387	8,459	8,643	8,945	9,361	9,874	10,469	11,13	11,846	12,604
L=15 м										
V_0 , м/с	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t, с	1,424	1,283	1,16	1,053	0,958	0,875	0,803	0,739	0,683	0,634
$\varphi - 35^\circ$	15,847	14,471	12,752	11,089	9,5987	8,2229	7,0764	6,1019	5,2994	4,612
$\dot{\varphi}$, c^{-1}	0,359	0,354	0,344	0,33	0,315	0,298	0,281	0,264	0,249	0,234
V_1 , м/с	10,267	10,314	10,443	10,669	10,992	11,407	11,903	12,47	13,095	13,773


 Рисунок 5 – Залежність часу скочування шлюпки (с) від початкової швидкості (м/с) при куті нахилу рампи 35° : ряд 1 – $L = 5$ м; ряд 2 – $L = 10$ м; ряд 3 – $L = 15$ м

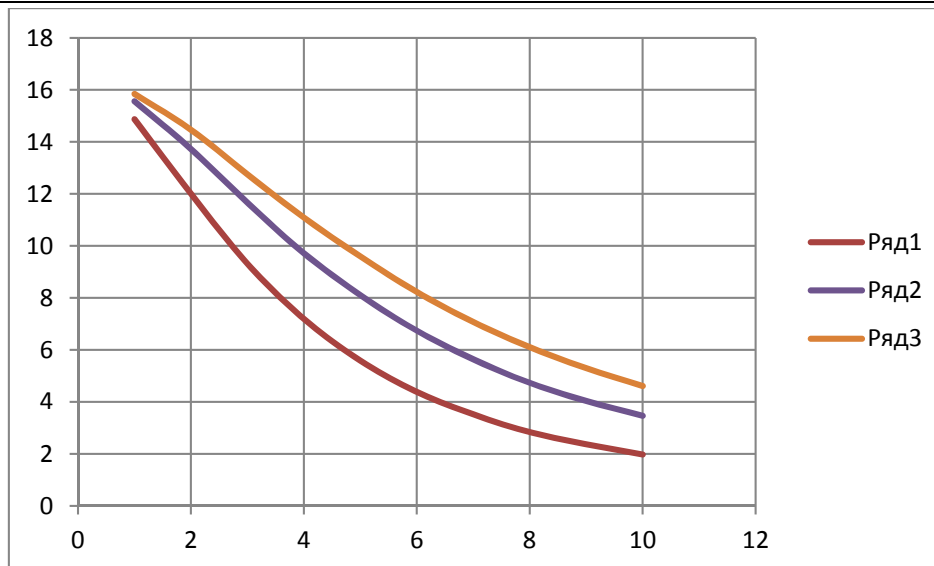


Рисунок 6 – Залежність кута тангажу (c^{-1}) від початкової швидкості (м/с) при скочуванні з похилої рампи при куті нахилу рампи 35° : ряд 1 – $L = 5$ м; ряд 2 – $L = 10$ м; ряд 3 – $L = 15$ м

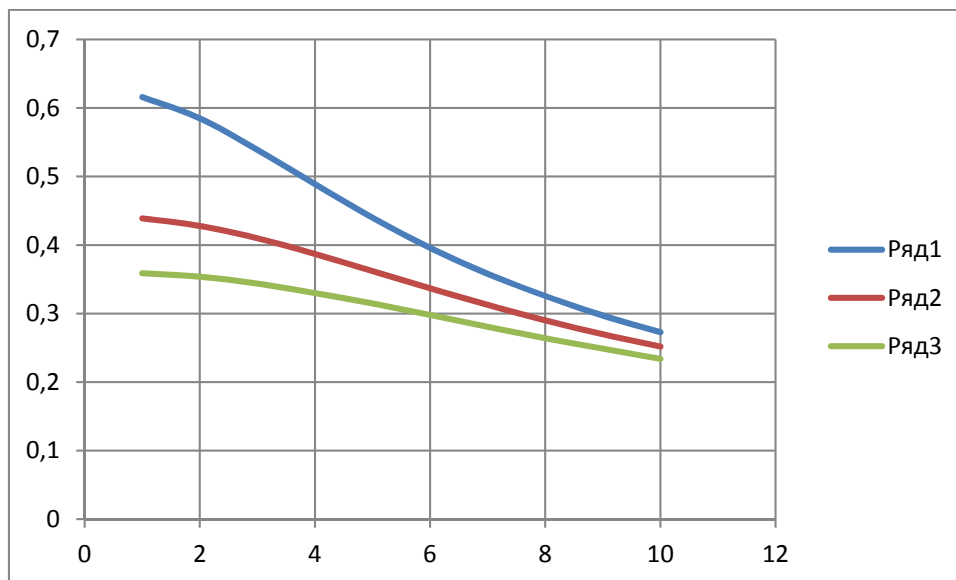


Рисунок 7 – Залежність кутової швидкості тангажу (c^{-1}) від початкової швидкості (м/с) при скочуванні з похилої рампи при куті нахилу рампи 35° : ряд 1 – $L = 5$ м, $V_0 = 6$ м/с; ряд 2 – $L = 10$ м, $V_0 = 8$ м/с; ряд 3 – $L = 15$ м, $V_0 = 10$ м/с

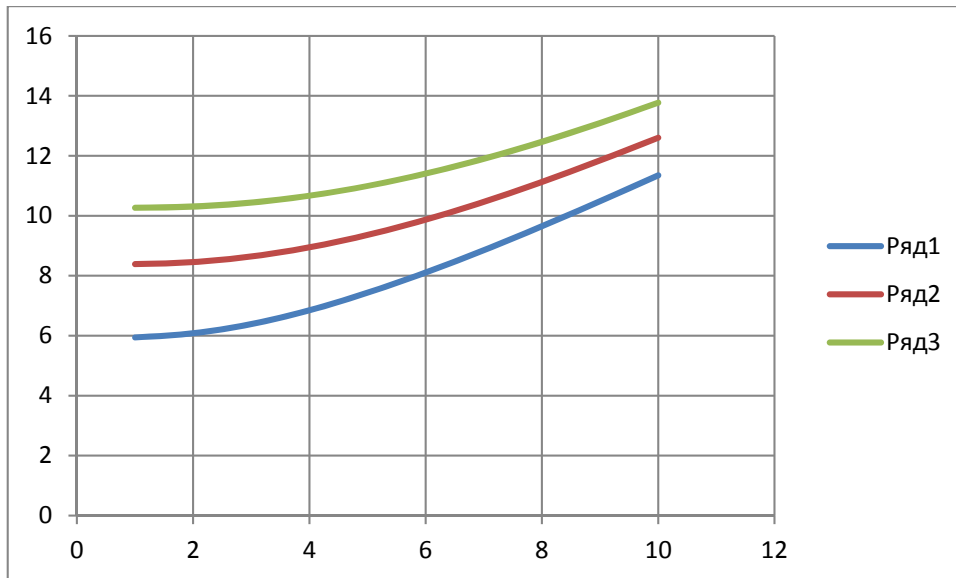


Рисунок 8 – Залежність швидкості центру мас шлюпку (м/с) в момент відриву від рампи від початкової швидкості (м/с) при куті нахилу рампи 35° : ряд 1 – $L = 5$ м, $V_0 = 6$ м/с; ряд 2 – $L = 10$ м, $V_0 = 8$ м/с; ряд 3 – $L = 15$ м, $V_0 = 10$ м/с

Як видно з графіків рис. 5 та даних табл. 1 час скочування зі збільшенням довжини шлюпки зростає а зі збільшенням початкової швидкості зменшується. Графіки залежностей часу скочування для шлюпок довжиною 5, 10 и 15 метрів мають вигляд майже еквідистантних вгнутих кривих. Час скочування для шлюпок довжиною 5, 10 и 15 м при зростанні початкової швидкості з 1 до 10 м/с зменшується з 0,762 до 0,234 с, з 1,136 до 0,444 с, і з 1,424 до 0,634 с відповідно, тобто зменшення часу при зростанні швидкості зі збільшенням довжини для досліджуваних шлюпок складає 0,528, 0,692 і 0,79 м/с.

З рис. 6 видно, що кути тангажу зі збільшенням швидкості зменшуються, а зі збільшенням довжини шлюпки зростають. Графіки являють собою спадні вгнуті криві, причому криві для більших довжин розташовуються вище, а їх кривизна зменшується – (залежність наближається до лінійної). Максимальні кути тангажу мають місце при початковій швидкості 1 м/с і для шлюпок довжиною 5, 10 і 15 м (табл. 1) складають $14,873^\circ$, $15,56^\circ$ і $15,847^\circ$ відповідно. При збільшенні початкової швидкості до 10 м/с кути тангажу цих шлюпок зменшуються до $1,975^\circ$, $3,465^\circ$ і $4,612^\circ$.

Кутові швидкості тангажу зі збільшенням початкової швидкості так само, як і зі збільшенням довжини спадають (рис. 7). При мінімальній початковій швидкості для досліджуваних довжин відповідні кутові швидкості тангажу дорівнюють (табл. 1) $0,616 \text{ с}^{-1}$, $0,439 \text{ с}^{-1}$ і $0,359 \text{ с}^{-1}$. При максимальній початковій швидкості ці величини зменшуються до $0,273 \text{ с}^{-1}$, $0,252 \text{ с}^{-1}$ і $0,234 \text{ с}^{-1}$.

Навпаки, швидкості центру мас шлюпок в момент відриву від рампи зі збільшенням початкової швидкості так само, як і зі збільшенням довжини зростають (рис. 8): для шлюпок довжиною 5 м, 10 м і 15 м - з 5,944 м/с до 11,352 м/с, з 8,387 м/с до 12,604 м/с і з 10,267 м/с до 13,773 м/с. Зі збільшенням початкової швидкості різниця швидкості центрів мас шлюпок різної довжини в момент відриву зменшується (відповідні криві сходяться).

На рис. 9 і 10 представлені графіки змінювання кута тангажу та кутової швидкості тангажу для шлюпок довжиною 5,10,15 м під час їх скочування.

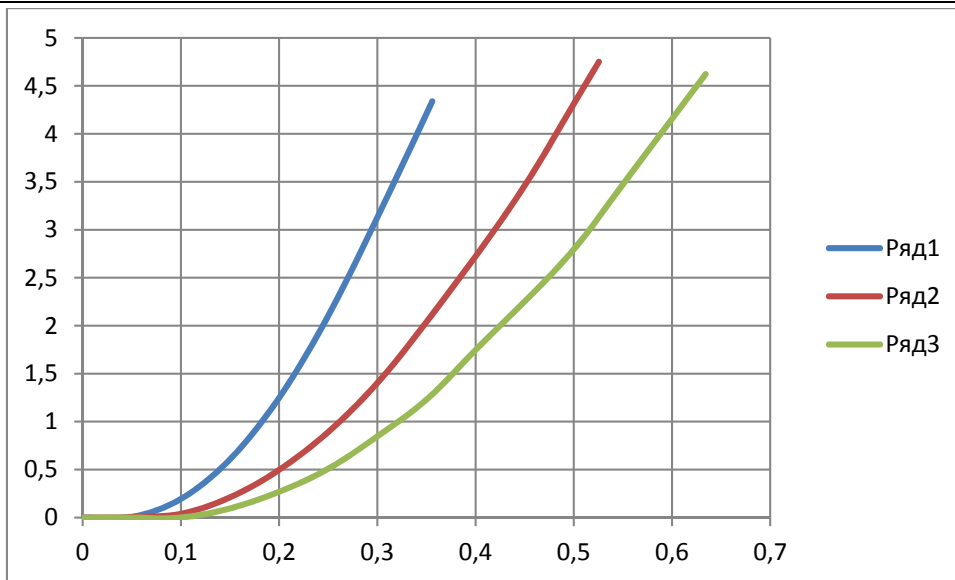


Рисунок 9 – Залежність кута тангажу ($с^{-1}$) від часу ($с$) при скочуванні з похилої рампи при куті нахилу рампи 35° : ряд 1 – $L = 5$ м, $V_0 = 6 \frac{м}{с}$; ряд 2 – $L = 10$ м, $V_0 = 8 \frac{м}{с}$; ряд 3 – $L = 15$ м, $V_0 = 10 \frac{м}{с}$

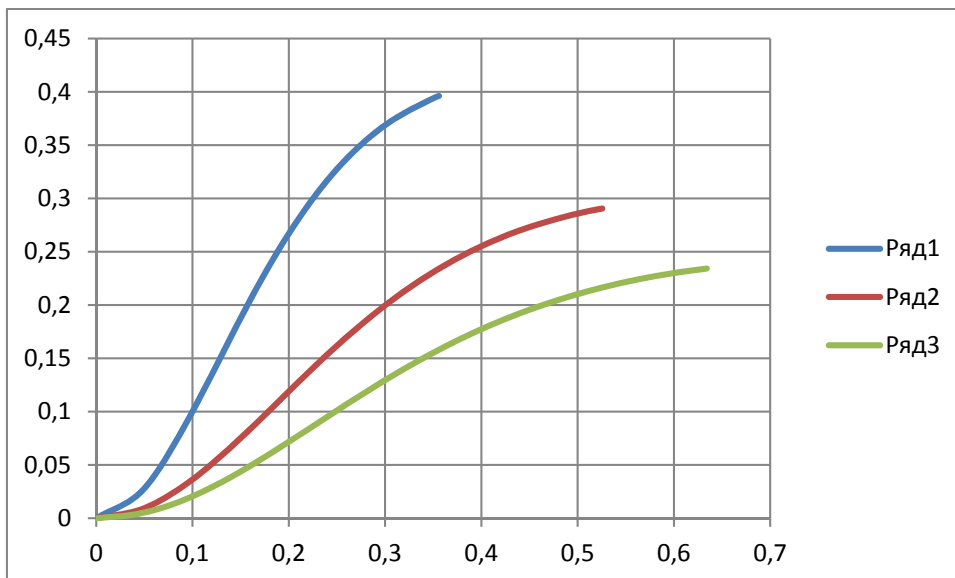


Рисунок 10 – Залежність кутової швидкості тангажу ($с^{-1}$) від часу ($с$) при скочуванні з похилої рампи при куті нахилу рампи 35° : ряд 1 – $L = 5$ м, $V_0 = 6 \frac{м}{с}$; ряд 2 – $L = 10$ м, $V_0 = 8 \frac{м}{с}$; ряд 3 – $L = 15$ м, $V_0 = 10 \frac{м}{с}$

Як видно з рис. 9 і 10 графіки залежності кута тангажу представлені вгнутими, а графіки залежності кутової швидкості тангажу – опуклими кривими. При цьому зі збільшенням часу кривини графіків зменшуються, а самі графіки для шлюпок більшої довжини розташовуються нижче. Кути тангажу для шлюпок довжиною 5, 10, і 15 м в момент відриву від рампи при заданих початкових швидкостях при розгоні шлюпки по похилій рампі, складають $4,34^{\circ}$, $4,75^{\circ}$ і $4,62^{\circ}$, а кутові швидкості – $0,396 с^{-1}$, $0,291 с^{-1}$ і $0,262 с^{-1}$ відповідно.

Висновки. Запропонований підхід дозволяє за допомогою чисельних експериментів проводити раціональний вибір параметрів руху РШВП, що сходять з похилої рампи.

На основі отриманих результатів в подальших дослідженнях слід з'ясувати вплив кута нахилу рампи і розташування центру мас шлюпки на параметри її руху на початку вільного падіння.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Free-fall lifeboat. *Wärtsilä* : *webportal*. URL : <https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/free-fall-lifeboat>
2. Нырющий катер. *MSD.com.ua* : *webportal*. URL : <https://msd.com.ua/katera/nyryayushhij-kater/>
3. Современные спасательные средства. *Korabley.net* : *webportal*. URL : http://korabley.net/news/spasatel'naja_shljupka_i_sovremennye_spasatelnye_sredstva/2010-12-13-724
4. *Seafarers.com.ua* : *webportal*. URL : <http://seafarers.com.ua/manned-free-fall-lifeboat-world-record-drop-40-meters-up/4013/>
5. Александров М. Н. Безопасность человека на море. Ленинград : Судостроение, 1983. 208 с.
6. Консолидированный текст конвенции СОЛАС-74. Санкт-Петербург. : ЗАО ЦНИИМФ, 1999.
7. Бугаенко Б. А., Нгуен Нгок Тан Особенности экстренного спуска с судна плавсредства с людьми. *Збірник наукових праць НУК*. Миколаїв : НУК, 2010. № 1 (430). С. 17–24.
8. Казарезов А. Я. Сбрасываемые спасательные шлюпки. *Збірник наукових праць УДМТУ*. Миколаїв : УДМТУ, 1998. № 1 (349). С. 76–80.
9. Колегаев, М. А., Иванов Б. Н., Басанец Н. Г. Безопасность жизнедеятельности и выживание на море : учебное пособие. Одесса : ОГМА, 2008. 352 с.
10. Михрин Л. М. Безопасность мореплавания. Санкт-Петербург : АМКОС, 2009. 559 с.
11. Бугаенко Б. А., Галь А. Ф. Принципы проектирования и особенности конструирования судовых устройств и судовой техники морских технологий. Николаев : УГМТУ, 1995. Ч. 2. С. 86–101.
12. Микитюк В. Е., Миронов Д. А. Расчет параметров движения шлюпки свободного падения при аварийном сбросе. *Материалы конференции «Безопасность мореплавания и ее обеспечение при проектировании и постройке судов»*. Николаев : НУК, 2007. С. 99–100.
13. Микитюк В. Е., Миронов Д. А. Параметры движения шлюпки свободного падения перед приводнением. *Матеріали I Міжнародної науково-технічної конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці»*. Миколаїв : НУК, 2010. С. 84–89.
14. Теоретична механіка: підручник для студентів ВНТЗ / кол. авторів за заг. ред. І.В.Кузьо. Харків : Фоліо, 2017. 780 с.
15. Березин И. С., Жидков Н. П. Методы вычислений. Москва : Физматгиз, 1962. Т.2. 639 с.

REFERENCES

1. Free-fall lifeboat. *Wärtsilä* : *webportal*. URL : <https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/free-fall-lifeboat>
2. Nihryayuthiyj kater. *MSD.com.ua* : *webportal*. URL : <https://msd.com.ua/katera/nyryayushhij-kater/>
3. Sovremenniye spasatel'niye sredstva. *Korabley.net* : *webportal*. URL : http://korabley.net/news/spasatel'naja_shljupka_i_sovremennye_spasatelnye_sredstva/2010-12-13-724
4. *Seafarers.com.ua* : *webportal*. URL : <http://seafarers.com.ua/manned-free-fall-lifeboat-world-record-drop-40-meters-up/4013/>

5. Aleksandrov, M. N. (1983). *Bezopasnostj cheloveka na more*. Leningrad : Sudostroenie.
6. Konsolidirovannihy tekst konvencii SOLAS-74. (1999). Sankt-Peterburg. : ZAO CNIIMF.
7. Bugaenko B. A., Nguen Ngok Tan. (2010). Osobennosti ehkstretnogo spuska s sudna plavsredstva s lyudjmi. *Zbirnyk naukovykh prats NUK*. Mykolaiv : NUK. 1 (430), 17–24.
8. Kazarezov A. Ya. (1998). Sbrasihvaemihe spasateljnihe shlyupki. *Zbirnyk naukovykh prats UDMTU*. Mykolaiv : UDMTU. 1 (349), 76–80.
9. Kolegaev, M. A., Ivanov, B. N., Basanec, N. G. (2008). *Bezopasnostj zhiznedeyateljnosti i vihzhivanie na more : uchebnoe posobie*. Odessa : OGMA.
10. Mikhrin L. M. (2009). *Bezopasnostj moreplavaniya*. Sankt-Peterburg : AMKOS.
11. Bugaenko B. A., Galj A. F. (1995). *Principih proektirovaniya i osobennosti konstruirovaniya sudovihkh ustroystv i sudovoy tekhniki morskikh tekhnologiyj*. Nikolaev : UGMTU. Ch. 2.
12. Mikityuk V. E., Mironov D. A. (2007). Raschet parametrov dvizheniya shlyupki svobodnogo padeniya pri avariynom sbrose. *Materialih konferencii «Bezopasnostj moreplavaniya i ee obespechenie pri proektirovanii i postroyjke sudov»*. Nikolaev : NUK. 99–100.
13. Mikityuk V. E., Mironov D. A. (2010). Parametri dvizheniya shlyupki svobodnogo padeniya pered privodnieniem. *Materialy I Mizhnarodnoi nauково-tekhnichnoi konferentsii «Innovatsii v sudnobuduvanni ta okeanotekhnitsi»*. Mykolaiv : NUK. 84–89.
14. *Teoretychna mekhanika : pidruchnyk dlia studentiv VNTZ / kol. avtoriv za zah. red. I. V. Kuzo*. Kharkiv : Folio.
15. Berezin I. S., Zhidkov N. P. (1962). *Metodih vihchisleniyj*. Moskva : Fizmatgiz. T. 2.

Горалик Е. Т., Крюков Н. Н. О ДВИЖЕНИИ СПАСАТЕЛЬНОЙ ШЛЮПКИ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ ПРИ СХОЖДЕНИИ С НАКЛОННОЙ РАМПЫ

Рассматривается задача о движении спасательной шлюпки свободного падения, которая моделируется однородным стержнем, при спходе с наклонной рампой. Цель исследования заключается в разработке и использовании адекватной математической модели для исследования параметров движения спасательной шлюпки свободного падения при спходе с наклонной под углом 35° рампой для исследования влияния начальной скорости и длины шлюпки на ее скорость, угловую скорость и угол тангажа в течение первой фазы падения. Получено решающих систему обыкновенных дифференциальных уравнений и сформулированы соответствующую задачу Коши, которая решается численно с помощью метода Рунге-Кутты. Дифференциальные уравнения движения стержня составленные с помощью уравнений Лагранжа второго рода. Предложенный подход позволяет с помощью численных экспериментов проводить рациональный выбор параметров движения РШВП, что сходит с наклонной рампой. На основе полученных результатов в дальнейших исследованиях следует выяснить влияние угла наклона рампой и расположение центра масс шлюпки на параметры ее движения в начале свободного падения.

Ключевые слова: спасательная шлюпка свободного падения, плоско-параллельное движение, стержень, наклонная рампой, уравнения Лагранжа второго рода, обыкновенные дифференциальные уравнения, задача Коши, численное моделирование, метод Рунге-Кутты.

Goralik E. T., Kryukov N. N. ON THE MOVEMENT OF A FREE FALL LIFEBOAT WHEN DESCENDING FROM THE INCLINED RAMP

The problem of the motion of a free-fall lifeboat, which is modeled by a homogeneous rod, when descending from an inclined ramp, is considered. The aim of the study is to develop and use an adequate mathematical model to study the parameters of the free-fall lifeboat when descending from a ramp inclined at an angle of 35° to study the effect of initial speed and length of the boat on its speed, angular velocity and pitch angle during the first phase. The solution system of ordinary differential equations is obtained and the corresponding Cauchy problem is formulated, which is solved numerically using the Runge-Kutta method. Differential equations of rod motion are compiled using Lagrange equations of the second kind. The proposed approach allows using numerical experiments to make a rational choice of motion parameters of the RSHVP, descending from the inclined ramp. Based on the results obtained, further studies should determine the effect of the angle of the ramp and the location of the center of mass of the boat on the parameters of its movement at the beginning of free fall.

Keywords: free fall lifeboat, plane-parallel motion, rod, inclined ramp, Lagrange equation of the second kind, ordinary differential equations, Cauchy problem, numerical simulation, Runge-Kutta method.

© Горалик Є. Т., Крюков М. М.

Статтю прийнято
до редакції 03.06.20

РОЗШИРЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ECDIS ЩОДО ПОПЕРЕДНЬОЇ ПРОКЛАДКИ В АКВАТОРІЇ ПОРТУ

Петровський А. В., к.т.н., доцент кафедри судноводіння Херсонської державної морської академії, e-mail: andreyanobody@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3337-9577

Поширеність використання ECDIS на судах торгового флоту та перехід на безпаперову навігацію висуває підвищені вимоги до таких навігаційних інформаційних систем. Метою статті є розширення функціональних можливостей ECDIS. При плануванні маршруту штурман повинен вивчити насамперед лоції очікуваних районів плавання, які мають як паперові, так і електронні каталоги. Однак, наявність електронних каталогів не надає інших переваг ніж існування такої інформації не на паперових носіях, оскільки вона не структурована для подальшого використання. Це може бути пов'язано із великою кількістю даних, які потрібно проаналізувати для безпечного проходження акваторій різних портів. Тим не менш є основні параметри, які вивчає штурман для попередньої прокладки, тобто є можливість структурувати інформацію, а деякі додаткові дані оформити як текстові повідомлення при здійсненні перевірки маршруту. При існуванні такої системи організації даних можливо розширити функціонал ECDIS щодо автоматичного редагування маршруту. При цьому збільшується кількість інформації по плечах маршруту, зменшується час на визначення кінцевого результату. У статті надано таку концептуальну схему організації структур даних і алгоритми її використання для підвищення інформаційного рівня проробки маршруту. Оскільки робота алгоритмів залежить від наповненості відповідних баз даних, необхідною умовою для реалізації є відкритість структур даних векторних карт. Наступним кроком для збільшення якості проробки маршруту є розробка методів автоматичного аналізу тексту лоцій для наповнення баз даних та можливого розширення їх деталізації. Розроблені структури даних і алгоритми не виключають потреби вивчення лоцій при попередній прокладці, однак, дозволяють інформувати о обов'язкових діях в акваторії обраного порту у визначений час і у визначеному місці.

Ключові слова: ENC, ECDIS, плечо маршруту, база даних.

DOI: 10.33815/2313-4763.2020.2.23.028–039

Вступ. Сучасні судові електронні картографічні навігаційні інформаційні системи (ECDIS) мають функціонал, який дійсно значно полегшує роботу штурмана у тому числі при попередній прокладці. Візуальне відображення результатів редагування у режимі реального часу полегшує побудову маршруту, при цьому необхідно пам'ятати і обмеження властиві ECDIS [1]. Однак, розвиток апаратного забезпечення дозволяє подальше розширювати та удосконалювати функціональні можливості ECDIS. Відомо, що для побудови переходу між портами, є потреба вивчення відповідних лоцій підходів до портів. При цьому деякі порти мають не тільки різні входи / виходи акваторії порту, а й в залежності від дедвейту судна, кількості терміналів, обмеженням мінімальної швидкості навантаження такі входи також можуть розподілятися. Між тим, оскільки лоції мають велику кількість корисної інформації, вона більшою часткою не структурована для її подальшого використання при автоматичній побудові маршруту засобами ECDIS, або таким спрощеним програмним забезпеченням як ChartBrowser [2], Admiralty Digital Catalog [3] та їх аналогами. Не зважаючи на більшу спрощеність, останнє програмне забезпечення (ПЗ) може побудувати попередній маршрут автоматично. Звісно такий маршрут не є кінцевим і повинен бути у подальшому опрацьованим у ECDIS, однак дозволяє визначити по даним Sailing Directions необхідні лоції, підібрати сукупність необхідних карт та Admiralty Information Overlay [4] для заказу та отримати текстову інформацію з електронних каталогів Адміралтейства. Інформація, яка надається електронними каталогами, представлена все ж такі у такому вигляді, начебто на більшості судів й досі використовуються паперові карти, і, штурману необхідно спочатку дуже ретельно вивчити райони плавання, щоб пристосувати отриману інформацію щодо планованого маршруту [5, 6]. Існування випадків посадки на мілину у акваторіях портів, не зважаючи на необхідність розрахування параметрів навігаційних глибин, безпечних для судна [7] (у кожному порті вони різні внаслідок великої кількості причин), сприяло розвитку, останній час, так званих Port

ECDIS, які мають набагато більше інформації ніж сучасні ENC масштабу карт-планів. Отримують розвиток такі карти, як PENC + gridded bathymetry. Вже є планування розподілення акваторій для ECDIS загального призначення та Port ECDIS [8, 9].

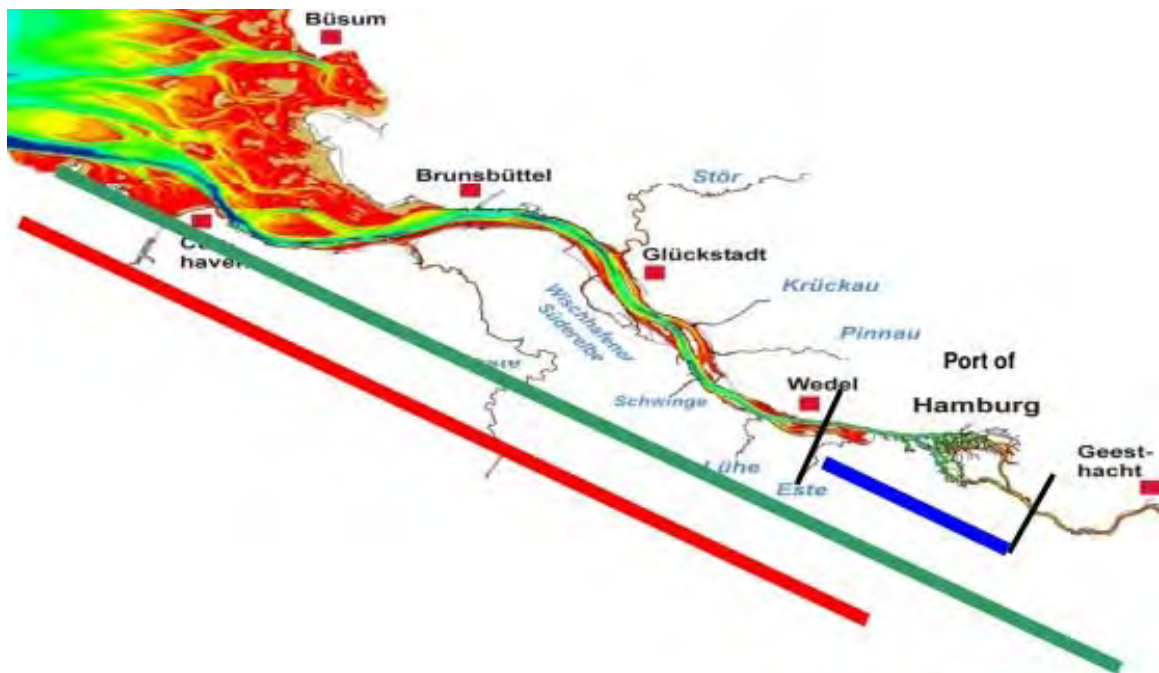


Рисунок 1 – Порт Гамбург (блакитним кольором виділено зону дії планованої Port ECDIS) [8]

Однак, на даний час це все на початковому рівні. Також не з'ясовано питання поєднання таких ECDIS із вже встановленими на судах. Тобто подальший розвиток збільшення інформатизації карт при плануванні маршруту стає очевидним, наслідком буде ще більше ускладнення аналізу інформації. Таким чином, актуальність розвитку засобів автоматизації процесів обробки таких даних не піддається сумніву.

Постановка задачі. Ретельна увага до систематизації великої кількості не структурованої інформації призводить до великих витрат часу. При цьому не є виключенням пропуски такої інформації, як: виставлення вогнів, знаків та сигналів на судні, радіо виклик служби контролю за рухом судів (VTS) при підході / відході / проході судном акваторією порту. Звісно, у деяких ECDIS, наприклад, Transas Navi Sailor 4000 [10], Navcom Voyager MB [11] та ін. є інформація щодо: припливів на обраний час на території портів, векторних об'єктів, розташованих на карті, у тому числі і на території порту, однак, ця інформація неповна у порівнянні із лоціями, крім того користувач повинен самостійно ознайомлюватись з нею. Деякі ECDIS потребують додаткового використання е-каталогів припливів від Admiralty Total Tide, або відображають таку інформацію спрощено, що звужує якість її візуального сприйняття, наприклад e-Globe G2 [12]. Тобто на даний час немає єдиних стандартів систематизації таких баз даних (БД) з вичерпною повнотою інформації, яку може використовувати встановлене програмне забезпечення (ПЗ) на судні. Наслідком цього є великі витрати часу на побудову попередньої прокладки для нанесення всіх важливих інформаційних контрольних точок на маршрут.

Метою статті є розробка концепції БД акваторії портів з відповідною структурою виключно для попередньої прокладки та надання алгоритмів її практичного використання існуючим ПЗ. *Предметом дослідження* є автоматизація інформаційного наповнення маршруту попередньої прокладки засобами ECDIS. *Об'єкт дослідження* – попередня прокладка.

Рішення. Оскільки дані розташування векторних об'єктів необхідні для наповнення БД запропонованої концепції, то основною вимогою функціонування БД та подальшого розширення функціоналу ECDIS щодо збільшення інформативності попередньої прокладки

є наявність відкритої структури SENC для використання вже введеної до карти інформації о векторних об'єктах.

Концептуальну схему структур даних надано у рис. 2. Всі зв'язки побудовані як відношення 1 – ∞ [13–14].

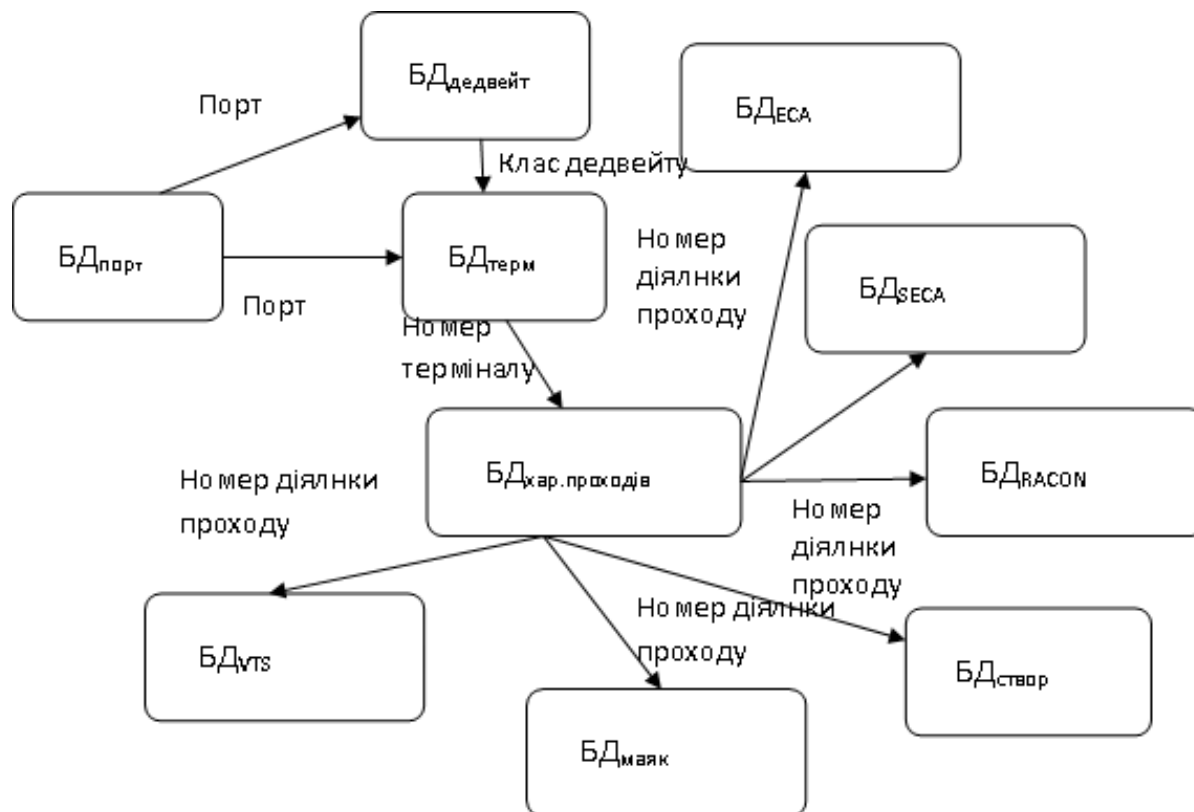


Рисунок 2 – Концептуальна схема взаємозв'язків структур даних

У ECDIS зони ЕСА, SECA є відкритими полігонами на SENC, тобто вони не замкнуті фігури, їх можливо представити сукупністю відрізків на визначених геопозиціях. Концепція передбачає відповідну структуру даних, за допомогою яких можливе збільшення як рівня автоматизації при побудові попередньої прокладки так і інформатизації кінцевого маршруту. Дані до БД можливо внести як в ручному режимі розробниками карт так і в автоматичному при побудові відповідних алгоритмів аналізу текстових даних лоцій. Подальше оновлення такої інформації може здійснюватися аналогічно процесу оновлення карт на судні. Побудований маршрут за приблизним варіантом [2, 3] переноситься до ECDIS, ПЗ якого отримує дані сукупності запропонованих БД, як з лоцій відповідного району плавання.

Загальна БД_{порт} – є БД портів та складається з двох полів:

- поле 1 – назва порту;
- поле 2 – дедвейт судів для навантаження/розвантаження;
- поле 3 – інша інформація.

Кількість записів для кожного порту залежить від кількості діапазонів дедвейту судів. БД_{УТС} має структуру запису:

- поле 1 – номер/назва проходу для виходу/входу до акваторії порту;
- поле 2 – широта точки контролю;
- поле 3 – довгота точки контролю;
- поле 4 – дистанція від точки контролю для здійснення обов'язкового радіообміну з VTS.

Кількість записів для кожного значення поля 1 дорівнює кількості точок радіообміну у межах акваторії порту.

БД_{ЕСА} має структуру запису:

- поле 1 – широта вершини полігону зони ЕСА;
- поле 2 – довгота вершини полігону зони ЕСА.

Кількість записів дорівнює кількості вершин зони ЕСА обраного порту.

БД_{SECA} має структуру запису:

- поле 1 – широта вершини полігону зони SECA;
- поле 2 – довгота вершини полігону зони SECA;
- поле 3 – вміст сірки у паливі (значення постійне в межах однієї зони і можливе

виділення в окрему постійну, але оскільки кількість вершин полігону невелике, то зберігати таке значення більш зручно у БД.

Кількість записів дорівнює кількості вершин зони SECA обраного порту.

БД_{хар.проходів} має структуру запису (проходи розподіляються на ділянки, кожна - має які небудь орієнтири: візуальні/радарні, геокоординати яких занесені до поля 2 та 3:

- поле 1 – номер/назва проходу для виходу/входу до акваторії порту;
- поле 2 – клас дедвейту;
- поле 3 – широта початку ділянки;
- поле 4 – довгота початку ділянки;
- поле 5 – широта кінця ділянки;
- поле 6 – довгота кінця ділянки;
- поле 7 – припустима швидкість на даній ділянці;
- поле 8 – швидкість течії;
- поле 9 – напрямок течії (град);
- поле 10 – інша інформація.

Кількість записів в межах 1 проходу дорівнює кількості його ділянок. Розподілення проходу на ділянки можливе по орієнтирах.

БД_{терм} має структуру запису:

- поле 1 – номер/назва проходу;
- поле 2 – номер терміналу;
- поле 3 – тип судна;
- поле 4 – клас дедвейту;
- поле 5 – мінімальна швидкість навантаження.

Кількість записів в межах 1 проходу дорівнює кількості його терміналів.

БД_{дедвейт} має структуру запису:

- поле 1 – порт;
- поле 1 – клас дедвейту;
- поле 2 – початок діапазону дедвейту;
- поле 3 – кінець діапазону дедвейту.

Кількість записів обмежується переліченням діапазонів дедвейтів, які можуть обслуговуватись портом.

Істинний напрямок створної лінії, що представляє справжній пеленг, на навігаційних картах зазвичай вказують в градусах, двома числами, причому перше число означає напрямок від знаків, а друге – на знаки.

БД_{створ} має структуру запису:

- поле 1 – номер/назва проходу;
- поле 2 – номер ділянки, як у БД_{хар.підходів};
- поле 3 – номер створа;
- поле 4 – напрямок від знаку;
- поле 5 – напрямок на знак.

Кількість записів для кожної ділянки обмежується кількістю встановлених створів.

Використання RACON в цілях, відмінних від засобів навігації, заборонено, тому вони використовуються для позначення таких об'єктів:

- маяки і навігаційні буї;
- судноплавні прогони під мостами;

- центральні лінії і точки повороту;
- морські нафтові платформи і тому подібні споруди.

В деяких країнах RACON використовуються також для позначення:

– тимчасових, нових і незрозумілих небезпек (вони передають азбукою Морзе символ «D»);

- як провідні лінії RACON.

БД_{RACON} має структуру запису:

- поле 1 – номер/назва проходу;
- поле 2 – номер ділянки, як у БД_{хар.подходів};
- поле 3 – широта розташування RACON;
- поле 4 – довгота розташування RACON;
- поле 5 – характеристики RACON.

Кількість записів для кожної ділянки обмежується кількістю встановлених пристроїв RACON.

БД_{маяк} має структуру запису:

- поле 1 – номер/назва проходу;
- поле 2 – номер ділянки, як у БД_{хар.подходів};
- поле 3 – широта розташування маяку;
- поле 4 – довгота розташування маяку;
- поле 5 – характеристики маяку.

Кількість записів для кожної ділянки обмежується кількістю маяків.

Оскільки у кожного маякового вогню є свої відмінні риси, за якими його можна ідентифікувати: забарвлення в різні кольори, послідовність спалахів (одні – короткі сигнали, інші – довгі, треті – тільки одну спалах, четверті – серію), повторюваність сигналів. При русі можна визначити конкретний вогонь по типу спалахів і часу циклу сигналу. Таким чином, можливе значення поля 5 може бути складною стрічкою, яка має позначки:

- F – постійне, безперервне світло;
- FI – миготливий. Тривалість спалахів коротше, ніж проміжок часу між ними.
- Q – швидкий. Швидке блимання, приблизно 50–80 спалахів в хвилину.
- Oc – затьмарює. Тривалість спалахів більше, ніж проміжки між ними. FI (2) – групи спалахів. Спалахи йдуть групами, зазвичай по 2, 3 або 4, як зазначено в позначенні.
- Alt – чергується.
- Oc (2) – групи проблісків.
- Iso – рівні фази.

Прикладом значення для поля 5 є вираз «П (4) 15s 90m 5M» (якщо немає вказівки на колір, значить, це білий вогонь. Червоний і зелений кольори позначаються буквами R і G відповідно).

Знаючи припустиму обмеження вимог порту для данного плеча маршруту швидкість, є можливість знайти його перетинання зон ECA, SECA та визначити контрольну точку (КТ) на плечі для планування яких-небудь дій. Наприклад, у зоні ECA діє заборона збросу фекальних вод з судів, що її перетинають, тобто потрібно продумати це питання заздалегідь. Геокоординати перетинання таких зон із побудованим маршрутом можливо знайти аналітично, вирішуючи систему лінійних рівнянь, де перше рівняння – функція плеча маршруту, друге – одна із функцій полігону таких зон:

$$\begin{cases} A_1x + B_1y + C_1 = 0 \\ A_2x + B_2y + C_2 = 0 \end{cases}$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} A_1 & B_1 \\ A_2 & B_2 \end{vmatrix}, \Delta_x = \begin{vmatrix} -C_1 & B_1 \\ -C_2 & B_2 \end{vmatrix}, C_y = \begin{vmatrix} A_1 & -C_1 \\ A_2 & -C_2 \end{vmatrix};$$

$$x = \frac{\Delta_x}{\Delta}, \quad y = \frac{\Delta_y}{\Delta}.$$

У загальному алгоритмі розглянуто всі вищезначені варіанти проходження плеч маршруту крізь зону ECA або SECA.

При цьому можливі наступні ситуації (рис. 3):

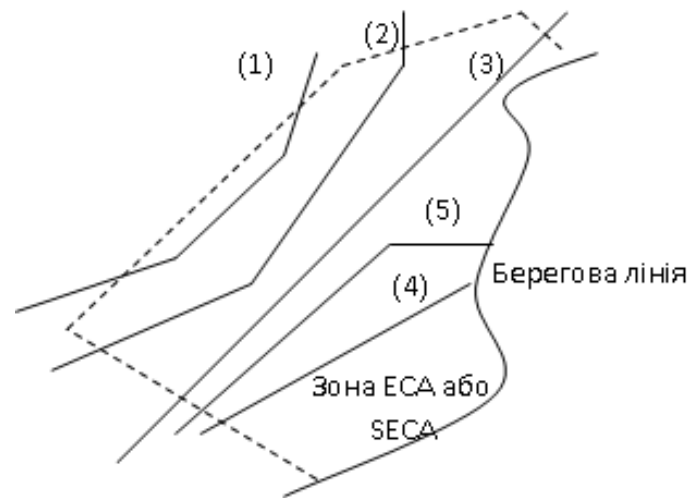


Рисунок 3 – Можливі ситуації проходу зон ECA, SECA:

(1) – перетинання маршрутом одного й того ж ребра зони ECA або SECA різними плечами; (2) – перетинання маршрутом різних ребер зони ECA, SECA різними плечами; (3) – перетинання маршрутом різних ребер зони ECA, SECA одним плечем; (4) – вихід / вхід у акваторію порту. У цьому випадку перетинання можливе тільки одне, але можуть бути декілька плечей – (5)

Розроблений алгоритм встановлення таких КТ на графічно зображеному маршруті у ECDIS надано на рис. 4.

Звичайно, у лоціях надані дистанції від відповідних берегових об'єктів, на яких є необхідність радіо докладу для VTS. Для визначення місцезнаходження (отримання геокоординат) такої КТ достатньо побудувати аналітичну залежність функції кола із радіусом, який надано у лоції. Далі, вирішив систему рівнянь, знайти точку перетинання (x^*, y^*) функції кола і функції плеча маршруту:

$$\begin{cases} A_1x + B_1y + C_1 = 0 \\ (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2 \end{cases}$$

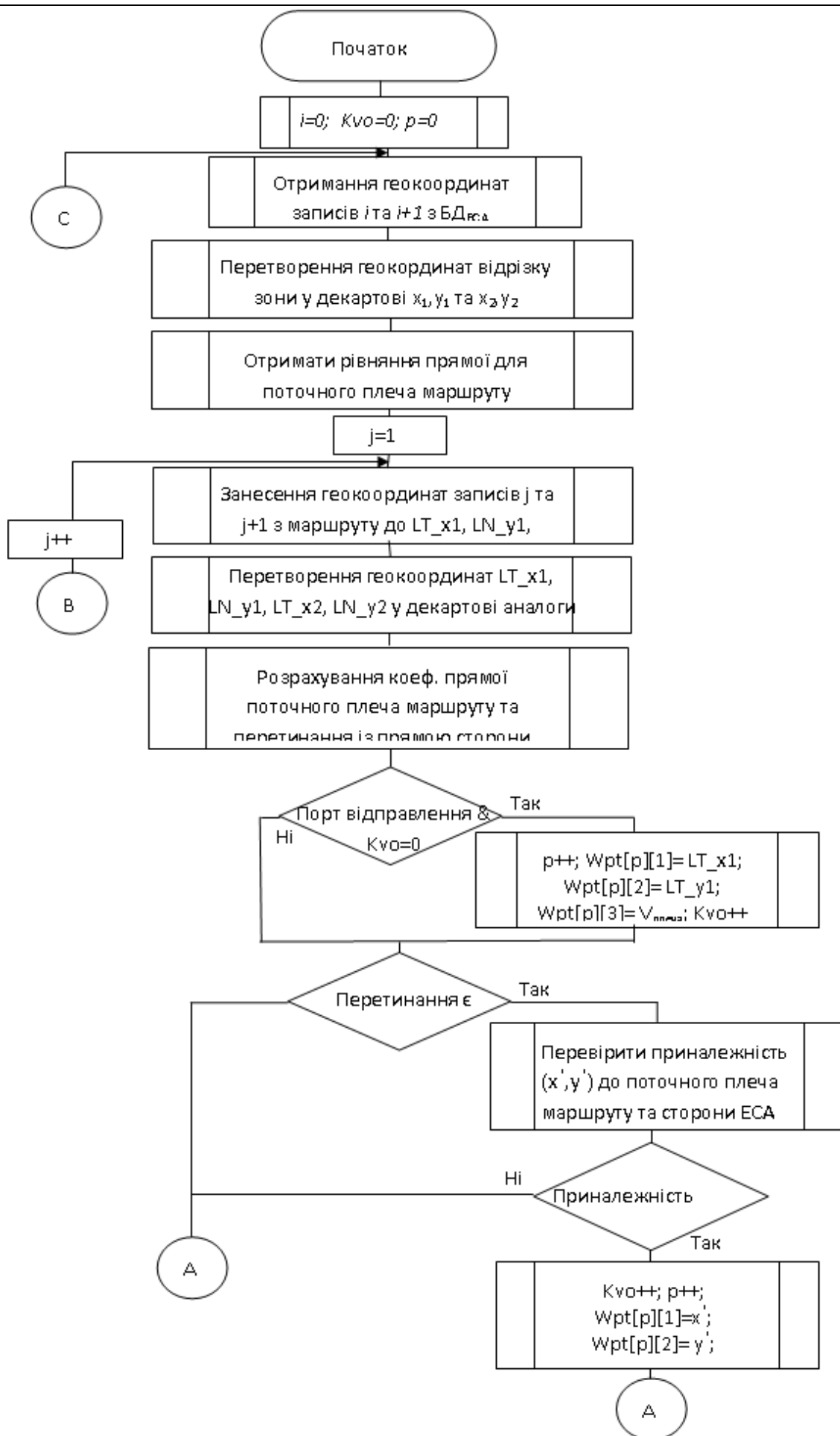
де R – дистанція радіо докладу у масштабі декартової сітки координат;

x_0, y_0 – перераховані геокоординати точки відліку дистанції у декартові координати. Таких КТ може бути декілька.

Звісно, для всіх розрахунків спочатку перетворюють геокоординати у декартові з масштабом карти SENC, найбільш пристосованим для прокладки у даній акваторії.

Після отримання декартових координат перетинання, ПЗ їх перетворює у геокоординати та додає графічну точку з текстовою інформацією у відповідну позицію на плечо маршруту із даними каналу зв'язку.

Оскільки пряма плеча маршруту перетинає круг дистанції двічі, є необхідність перевірки приналежності точки перетинання плечу маршруту, а також виключення хибної точки.



4. Користуючись координатами початку и кінця плеча, знайти коефіцієнти рівняння прямої, на якій лежить поточне плече маршруту.
5. Відкрити БД_{VTS} для отримання інформації стосовно даного проходу: дистанції радіо докладу від визначених орієнтирів. Зчитати першу запис ($j=1$).
6. Занести геокоординати з БД_{VTS} до масивів: дистанцій докладу $R[j]$, широти і довготи $VTS_LT[j]$, $VTS_LN[j]$
7. Перетворити координати $VTS_LT[j]$, $VTS_LN[j]$ у декартові.
8. Отримати коефіцієнти рівняння кола з координатами центру $VTS_LT[j]$, $VTS_LN[j]$ і радіусом $VTS_R[j]$
9. Розрахувати точки перетину прямої і кола, якщо вони є. Оскільки розглядається ребро зони, то перевірити точки перетину на приналежність до поточного плеча маршруту (умовою приналежності буде одночасне виконання умов $x_1 \leq x^{1,2} \leq x_2$ та $y_1 \leq y^{1,2} \leq y_2$, де $x^{1,2}$, $y^{1,2}$ – перша та друга абсциси та ординати точок перетину,
10. Якщо перетинань немає, то взяти на аналіз координати наступної контрольної точки зони дії VTS ($j=j+1$). Перехід на п.6. Інакше п.11
11. Оскільки напрям вхід /вихід з порту на впливає на координати плеча маршруту, тобто з будь-якої сторони координати x_1, y_1 завжди будуть початком плеча, то обирати з кількох точок перетинання ту, що ближче до початку плеча - до точки з координатами x_1, y_1
12. Перетворити декартові координати точки перетину у геокоординати.
13. У режимі редагування маршруту встановити графічно КТ на плечі маршруту за отриманими геокоординатами. Встановити підпис з радіо частотою виклику служби VTS.
14. Перевірити наявність кінця записів у БД_{VTS}. Якщо всі записи перевірені, то перехід на п.2, інакше взяти на аналіз координати наступної контрольної точки зони дії VTS ($j=j+1$). Перехід на п.6

Алгоритм враховує також ситуації необхідності декількох точок радіообміну вдовж одного плеча маршруту і можливий прохід судна на відстані, яка більше ніж дистанція для докладу (перетинання із дистанційним кругом відповідної КТ не існує).

Висновки і перспектива подальших наукових досліджень. Запропонована структура БД акваторії портів може бути використана ПЗ ECDIS для автоматичного інформаційного наповнення маршруту у місцях, де є необхідність обов'язкового використання деяких правил, послідовностей дій, наприклад, при плаванні у акваторіях портів, з метою зменшення витрат часу штурманів для запам'ятовування деталей лоцій. Оскільки, не зважаючи на збільшення рівня автоматизації сучасних ECDIS, наочні та РЛ спостереження є все ж таки основними у портах [15], то заздалегідь визначені геокоординати на плечах маршруту окремих дій, надають можливість штурману приділяти більше уваги реальній обстановці.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Some questions about the «berth to berth» concept applied to ECDIS : *веб-сайт*. URL: <https://www.practicosdepuerto.es/collegio-federacion/publicaciones/some-questions-about-%E2%80%9Cberth-berth%E2%80%9D-concept-applied-ecdis> (дата звернення 23.10.2020)
2. Chart World Chart Browser 2.1: *веб-сайт*. URL : <https://chartworld-chartbrowser.software.informer.com/2.1/> (дата звернення 22.10.2020)
3. ADMIRALTY Digital Catalogue User Guide v2.6 : *веб-сайт*. URL: <https://www.admiralty.co.uk/AdmiraltyDownloadMedia/ADMIRALTY%20Digital%20Catalogue/ADCUserGuide.pdf> (дата звернення 20.10.2020)
4. User Guide Admiralty Information Overlay : *веб-сайт*. URL: <https://www.admiralty.co.uk/AdmiraltyDownloadMedia/AVCS/AIO%20-%20User%20Guide.pdf> (дата звернення 21.10.2020)

5. IMO RESOLUTION A.893(21). Guidelines for Voyage Planning : веб-сайт. URL: <https://dokumen.tips/documents/imo-resolution-a89321-guidelines-for-voyage-resolution-a89321a-2res893.html> (дата звернення 19.10.2020)
6. Петровський А. В. Алгоритм підвищення проробки маршруту переходу на картах SENC засобами ECDIS. *Materiály XVI Mezinárodní vědecko–praktická konference «Zprávy výdecké ideje»*, 22–30 жовня 2020р. Praha : Publishing House «Education and Science», 2020, V(5), С. 32–36.
7. Impact of Chart Data Accuracy on the Safety of Navigation : веб-сайт. URL : https://www.transnav.eu/Article_Impact_of_Chart_Data_Accuracy_on_Acomi,54,1018.html. (дата звернення 23.10.2020)
8. The EU Project – Port ECDIS – Development of a new enhanced ENC standard for use in ports and harbours : веб-сайт. URL : [https://hydrography.ca/wp-content/uploads/files/2010conference/6-7_Seefeldt\(paper\).pdf](https://hydrography.ca/wp-content/uploads/files/2010conference/6-7_Seefeldt(paper).pdf) (дата звернення 23.10.2020)
9. Enhance Berth to Berth Navigation Requires High Quality ENC's - The Port ENC - a Proposal for a New Port Related ENC Standard : веб-сайт. URL : https://www.transnav.eu/Article_Enhance_Berth_to_Berth_Navigation_Seefeldt,18,280.html (дата звернення 23.10.2020)
10. Navi Sailor 4000/4100. User's manual. Санкт Петербург : Транзас, 2009. 315 с.
11. Навигационная система ЭКНИС/СОЭНКИ NavComVoyager. веб-сайт. URL: http://www.navcom.ru/catalog/eknis/voyager_kompl/ECDIS_SB_1.pdf (дата звернення 18.10.2020)
12. e-Globe G2 User's Guide Revision 2.0.0. ChartWorld International Ltd, Limassol, Cyprus. August 2017. 256 с.
13. Руководство по проектированию реляционных баз данных: веб-сайт. URL : <https://metanit.com/sql/tutorial/> (дата звернення 20.10.2020)
14. Структура реляционных баз данных : веб-сайт. URL : <https://www.oracle.com/ru/database/what-is-a-relational-database/> (дата звернення 20.10.2020)
15. ECDIS Navigation in 2018. веб-сайт. URL : <https://wpassets.porttechnology.org/wp-content/uploads/2019/05/25184726/LOC.pdf> (дата звернення 23.10.2020)

REFERENCES

1. Some questions about the «berth to berth» concept applied to ECDIS. Retrieved from <https://www.practicosdepuerto.es/colegio-federacion/publicaciones/some-questions-about-%E2%80%9Cberth-berth%E2%80%9D-concept-applied-ecdis>
2. ChartWorld ChartBrowser 2.1. Retrieved from <https://chartworld-chartbrowser.software.informer.com/2.1/>
3. Admiralty Digital Catalogue User Guide v2.6. Retrieved from <https://www.admiralty.co.uk/AdmiraltyDownloadMedia/ADMIRALTY%20Digital%20Catalogue/ADCUserGuide.pdf>
4. User Guide Admiralty Information Overlay. Retrieved from <https://www.admiralty.co.uk/AdmiraltyDownloadMedia/AVCS/AIO%20-%20User%20Guide.pdf>
5. IMO RESOLUTION A.893(21). Guidelines for Voyage Planning. Retrieved from <https://dokumen.tips/documents/imo-resolution-a89321-guidelines-for-voyage-resolution-a89321a-2res893.html>
6. Petrovskiy A. V. (2020). Alhorytm pidvyshchennia prorobky marshrutu perekhodu na kartakh SENC zasobamy ECDIS. *Materiály XVI Mezinárodní vědecko–praktická konference «Zprávy výdecké ideje»*, 22–30 жовня 2020р. Praha : Publishing House «Education and Science», V(5), 32–36..
7. Impact of Chart Data Accuracy on the Safety of Navigation веб-сайт. Retrieved from https://www.transnav.eu/Article_Impact_of_Chart_Data_Accuracy_on_Acomi,54,1018.html

8. The EU Project – Port ECDIS – Development of a new enhanced ENC standard for use in ports and harbours. Retrieved from [https://hydrography.ca/wp-content/uploads/files/2010conference/6-7_Seefeldt\(paper\).pdf](https://hydrography.ca/wp-content/uploads/files/2010conference/6-7_Seefeldt(paper).pdf)
9. Enhance Berth to Berth Navigation Requires High Quality ENC's – The Port ENC – a Proposal for a New Port Related ENC Standard. website. Retrieved from https://www.transnav.eu/Article_Enhance_Berth_to_Berth_Navigation_Seefeldt,18,280.html
10. Navi Sailor 4000/4100. (2009). User's manual. Sankt-Peterburg : Transas.
11. Navyhatsyonnaia systema EKNYS/SOENKY NavComVoyager. website. Retrieved from http://www.navcom.ru/catalog/eknis/voyager_kompl/ECDIS_SB_1.pdf
12. E-Globe G2 User's Guide Revision 2.0.0. (2017). Chart World International Ltd, Limassol, Cyprus. August.
13. Rukovodstvo po proektyrovanyiu reliatsyonnikh baz dannikh. Retrieved from <https://metanit.com/sql/tutorial/>
14. Struktura reliatsyonnikh baz dannikh. Retrieved from <https://www.oracle.com/ru/database/what-is-a-relational-database/>
15. ECDIS Navigation in 2018. Retrieved from <https://wpassets.porttechnology.org/wp-content/uploads/2019/05/25184726/LOC.pdf>

Петровский А. В. РАСШИРЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ECDIS ПО ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПРОКЛАДКЕ В АКВАТОРИИ ПОРТА

Распространенность использования ECDIS на судах торгового флота и переход на безбумажную навигацию предъявляет повышенные требования к навигационным информационным системам. Целью статьи является расширение функциональных возможностей ECDIS. При планировании маршрута штурман должен изучить прежде всего лоции ожидаемых районов плавания, которые имеют как бумажные, так и электронные каталоги. Однако, наличие электронных каталогов не предоставляет других преимуществ кроме существования такой информации не на бумажных носителях, поскольку она не структурирована для дальнейшего использования. Это может быть связано с большим количеством данных, которые нужно проанализировать для безопасного прохода акваторий различных портов. Тем не менее можно выделить основные параметры, которые изучает штурман для предварительной прокладки, значит есть возможность структурировать информацию, а некоторые дополнительные данные оформить как текстовые сообщения при осуществлении проверки маршрута. При существовании такой системы организации данных возможно расширить функционал ECDIS по автоматическим редактированием маршрута. При этом увеличивается количество информации по плечам маршрута, уменьшается время на определение конечного результата. В статье представлена такая концептуальная схема организации структур данных и алгоритмы ее использования для повышения информационного уровня проработки маршрута. Поскольку работа алгоритмов зависит от наполненности соответствующих баз данных, необходимым условием для реализации является открытость структур данных векторных карт. Следующим шагом для увеличения качества проработки маршрута является разработка методов автоматического анализа текста лоций для наполнения баз данных и возможного расширения их детализации. Разработанные структуры данных и алгоритмы не исключают необходимости изучения лоции при предварительной прокладке, однако, позволяют информировать об обязательных действиях в акватории выбранного порта в определенное время или в определенном месте.

Ключевые слова: ENC, ECDIS, плечо маршрута, база данных.

Petrovskiy A. V. EXPANDING ECDIS FUNCTIONALITY FOR PRELIMINARY ROUTING IN THE PORT WATER

The widespread use of ECDIS on merchant marine vessels and the transfer to paperless navigation increased demands on navigation information systems. The purpose of this article is to expand the functionality of ECDIS. When the route is planned, at first the navigator has to study the sailing directions of the expected navigation areas, which have both paper and electronic catalogs. However, the availability of electronic catalogs does not provide any other advantage besides the existence of such information in non-paper form, since it is not structured for further use. This may be due to the large amount of data that needs to be analyzed for the safe passage of the various ports. Nevertheless, it is possible to single out the main parameters that the navigator studies for preliminary route, which means it is ability to structure the information, and arrange some additional data as text messages during the route checking. If such a data organization system exists, it is possible to expand the functionality of ECDIS for automatic route editing. So, the amount of information on the legs of the route increases, the time for determining the final result decreases. The article presents

such a concept scheme of the data structures organization and algorithms for its use to increase the information level of the route elaboration. Since the operation of the algorithms depends on the fullness of the corresponding databases, a necessary condition for implementation is the openness of the vector maps data structures. The next step to increase the quality of the route elaboration is the development of methods for automatic analysis of the route text for filling the databases and possibly expanding their detail. The developed data structures and algorithms do not exclude the need to study the sailing directions during preliminary routing, however, they allow informing about the mandatory actions in the selected port water area at a certain time or in a certain place.

Keywords: ENC, ECDIS, route leg, database.

© Петровський А. В.

Статтю прийнято
до редакції 28.10.20

МЕТОДИ ЗБЛИЖЕННЯ ПОВІТРЯНОГО АБО МОРСЬКОГО СУДНА З ІНШИМ СУДНОМ, ТА АЛГОРИТМІВ ТРАЄКТОРНОГО КЕРУВАННЯ НИМИ

Селіванов С. Є., д.т.н., професор Херсонської державної морської академії, e-mail: selivanstas1940@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8813-6276

Годованюк С. П., к.т.н., старший викладач Херсонської державної морської академії, e-mail: godovaniuk1969@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0382-2440

Згідно стандарту вищої освіти України: перший (бакалаврський) рівень, галузь знань 27 – Транспорт, за спеціальністю 275 – Транспортні технології до спеціальних (фахових, предметних) компетентностей відноситься «здатність організовувати взаємодію видів транспорту», тому у роботі наводяться результати наукових досліджень по зазначеній темі. Необхідність взаємодії між морським і повітряним судном або морським судном з іншим може виникнути в тих випадках, якщо одне з них або перебуває в аварійній ситуації, або бере участь в операціях SAR (search and rescue – пошук і рятування). Для поліпшення характеристик траєкторії керованого руху рятувальних засобів в точку зустрічі з аварійним судном повітряного або морського судна, запропоновано вводити в систему керування та стабілізації рятувального засобу алгоритм (метод) зближення. Аналіз досвіду керування суднами показує, що метод прямого зближення використовується при зближенні з неманевреними малорухомими об'єктами. Розглянутий алгоритм прямого зближення при командному керуванні повітряним судном; метод зближення з найвигіднішою точкою випередження під час штурвального керування повітряним судном; синтез методів зближення морських засобів рятування на воді та алгоритмів траєкторного керування; проаналізовані методи зближення морських суден з аварійним об'єктом; показано, що метод прямого зближення суттєво не відрізняється від методу зближення повітряного судна із аварійним судном; приведена схема стабілізації судна на відрізках маршруту.

Ключові слова: синтез методів, методи зближення, повітряне судно, морське судно, рятувальне судно, алгоритм траєкторного керування, схема стабілізації судна.

DOI: 10.33815/2313-4763.2020.2.23.040–049

Вступ. У разі виникнення аварійної ситуації на морі починає працювати єдина система пошуку та рятування на морі в Україні. Залежно від обстановки, яка супроводжує аварійну ситуацію та швидкості її розвитку, в процесі порятунку застосовуються авіаційні або морські засоби рятування, а в разі високої динаміки розвитку аварійної ситуації можуть використовуватися і ті й інші засоби одночасно або послідовно. Для широкомасштабної пошуково-рятувальної операції прийняте скорочення MRO (mass rescue operation) [1, 2].

Авіаційні засоби зближення із судном використовуються у випадку надання допомоги екіпажу судна. У цьому випадку використовується метод прямого зближення. Для надання допомоги екіпажу судна, наприклад, що дрейфує та рухається прямолінійно з постійною швидкістю, доцільно використовувати метод зближення з найдоцільнішою точкою зустрічі.

Після визначення оптимального району, у якому необхідно розгортати зближення повітряного або морського судна необхідно спланувати план дій, у якому вказується, коли, де повинно знаходитися засіб що бере участь у операції [3, 4]

Для поліпшення характеристик траєкторії керованого руху рятувальних засобів в точку зустрічі з аварійним судном повітряного або морського судна, запропоновано вводити в систему керування та стабілізації рятувального судна алгоритм (метод) зближення суден. Аналіз досвіду керування суднами показує, що метод прямого зближення використовується при зближенні з неманевреними малорухомими об'єктами.

Постановка задачі. Залежність параметра керування траєкторним зближенням від параметрів, що характеризують взаємне переміщення аварійного судна й авіаційного засобу порятунку (літака, вертольота) у процесі їх зближення, окреслюється алгоритмом траєкторного керування. Кожному алгоритму траєкторного керування та відповідному рівнянню ідеального зв'язку відповідає певний метод зближення літака (вертольота) з аварійним судном. Під час руху літака протягом усього часу польоту по траєкторії

зближення, для якої виконуються умови ідеального зв'язку для каналів бічного й поздовжнього рухів, можна стверджувати, що літак рухається ідеальною траєкторією, яку в розрахунках можна вважати опорною.

На вибір методу зближення впливають тип об'єкта, який рятують, і характер його руху (дрейфу), а також вид технічних засобів рятування [5].

На вибір певного методу зближення істотно впливають маневрені властивості літака (вертольота) та судна, яке рятується у дрейфі. Якщо ці судна мають малу маневреність, то траєкторне керування літаком за курсом на етапі зближення з аварійним судном зводиться відповідно до методу прямого наведення. Перевага такого методу полягає в тому, що повітряне судно не повинно робити значний маневр у горизонтальній площині.

Із урахуванням параметрів керування записується алгоритм прямого зближення при командному керуванні повітряним судном, розглядається метод зближення з найвигіднішою точкою випередження під час штурвального керування повітряного судна. По визначеному сценарію проаналізовані методи зближення морських суден з аварійним об'єктом і обрані типові з них.

Мета роботи. Головною метою синтезу методу є визначення алгоритму траєкторного керування, що забезпечує суттєве скорочення часу на подолання відстані до точки зустрічі засобів рятування з аварійним судном.

Результати досліджень. Дослідження проводились по двом сценаріях: 1. Синтез методів зближення авіаційних засобів рятування із судном, що потерпає від лиха, та алгоритмів траєкторного керування ними; 2. Синтез методів зближення морських засобів рятування на воді та алгоритмів траєкторного керування.

Розглянемо перший сценарій для цього проведемо результати дослідження алгоритму прямого зближення при командному керуванні повітряним судном.

Параметрами керування траєкторним зближення $U_{\text{пр.Г}}$ й $U_{\text{пр.В}}$ повітряного судна для каналів бічного та поздовжнього керування є кути $\varphi_{\text{Г}}$, $\varphi_{\text{В}}$, які утворюють дві взаємно перпендикулярні проекції кута між поздовжньою віссю і лінією візування в площині, у яких здійснюється керування за курсом і тангажем відповідно до такого алгоритму [6]:

$$U_{\text{пр.Г}} = k_{\text{п.м}} \varphi_{\text{Г}}; \quad (1)$$

$$U_{\text{пр.В}} = k_{\text{п.м}} \varphi_{\text{В}}. \quad (2)$$

Основна перевага цього методу полягає в простоті одержання необхідних керувальних сигналів $\varphi_{\text{Г}}$ і $\varphi_{\text{В}}$.

Істотним недоліком методу прямого зближення є вимога стабілізації поздовжньої осі повітряного судна по лінії візування s_o (рис. 1). Задовольнити цю вимогу можна тільки під час зближення з нерухомим об'єктом порятунку. З аналізу рис. 1. випливає, що навіть при ідеальному зближенні, повітряне судно летить у фіктивну точку $O_{\text{ф.АС}}$. Тому, рятувальне повітряне судно буде наближатися до судна, що потерпає від лиха, завжди із задньої напівсфери. Із цього аналізу видно, що метод прямого зближення може бути прийнятним під час зближення повітряного судна із нерухомим об'єктом, що терпить лихо на воді.

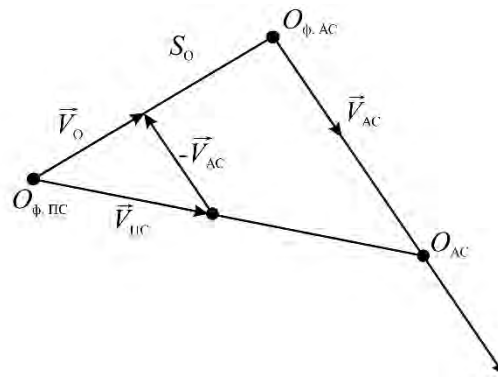


Рисунок 1 – Геометричні співвідношення, що характеризують процес ідеального зближення повітряного судна у горизонтальній площині

Розглянемо метод зближення з найвигіднішою точкою випередження під час штурвального керування повітряного судна.

У разі зближення повітряного судна із аварійним судном, використовуючи цей метод зближення, параметрами керування в ручному режимі будуть [7]:

$$U_{NG} = k_{Г.М}(\varphi_{Г}^* - \varphi_{Г.Н}^*); \tag{3}$$

$$U_{NB} = k_{П.М}(\varphi_{В}^* - \varphi_{В.Н}^*), \tag{4}$$

де $\varphi_{Г}^*$ і $\varphi_{В}^*$ – фактичні кути між лінією візування й вектором повітряної швидкості в площині його поздовжнього й бічного рухів; $k_{Г.М}$ – масштабний коефіцієнт, аналогічний $k_{П.Н}$ при методі прямого наведення.

Кути $\varphi_{Г}^*$ і $\varphi_{Г.Н}^*$ визначаються в горизонтальній площині, а кути $\varphi_{В}^*$ і $\varphi_{В.Н}^*$ – у вертикальній.

Припускаючи, що повітряне судно рухається на зближення з аварійним судном на постійній висоті зі сталою швидкістю, побудуємо трикутник їх зближення $O O_{АС} O_{ТЗ}$ у горизонтальній площині (рис. 2).

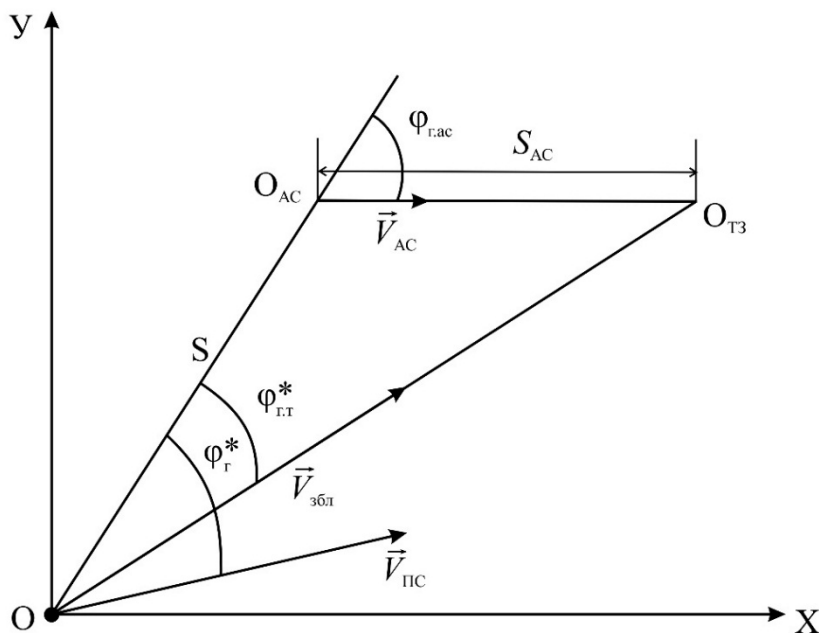


Рисунок 2 – Трикутник зближення повітряного судна з аварійним судном, що дрейфує, у горизонтальній площині

На рис. 2. точками $O O_{AC} O_{T3}$ позначено положення повітряного судна, судна, що потерпає аварію та найвигіднішої точки упередження в поточний момент часу. У процесі їх ідеального зближення, повітряне судно рухається прямолінійно в напрямку точки O_{T3} , куди само дрейфує аварійне судно.

Для визначення кута упередження $\varphi_{Г.Т}^*$, скориставшись трикутником рис. 1, запишемо:

$$S = V_C t_H \cos \varphi_{Г.Т}^* - V_{AC} t_H \cos \varphi_{Г.аc}^*; \quad (5)$$

$$V_{AC} t_H \sin \varphi_{Г.аc}^* = V_C t_H \sin \varphi_{Г.Т}^*. \quad (6)$$

У рівняннях (5) і (6) V_{AC} – вектор швидкості аварійного судна (його дрейф); t_H – час зближення повітряного судна з аварійним судном, S – відстань між повітряним судном і аварійним судном $O O_{AC}$; U_{HT} – кутова похибка зближення, $U_{HT} = \varphi_{Г} \cdot \varphi_{Г.Т}^*$ щодо лінії $O O_{T3}$; $\varphi_{Гac}^*$ – кут між вектором V_{AC} і лінією візування $O O_{AC}$.

Додамо до динамічних рівнянь кінематичні рівняння:

$$V_{збл} = V_{AC} \cos \varphi_{Гac}^* - V_C \cos \varphi_{Г.Т}^*; \quad (7)$$

$$S \dot{\varepsilon} = V_C \sin \varphi_{Гac}^* - V_{AC} \sin \varphi_{Гac}^*, \quad (8)$$

які визначаються як проекції векторів V_{AC} і V_{T3} на лінію візування $O O_{T3}$ і є нормальні до неї. Щоб виразити кут $\varphi_{Г.Т}^*$ через параметри взаємного руху повітряного судна і судна, що терпить лихо, досить розв'язати системи рівнянь (7), (8), (5) і (6). Насправді, помноживши обидві частини рівняння (5) на час t_H і вносячи отриманий результат (6), визначимо:

$$\sin \varphi_{Г.Т}^* = -\frac{StH}{V_{стc}} + \dot{\varepsilon}_H, \quad (9)$$

на практиці замість (5) використовують більш компактне представлення:

$$\varphi_{Г.Т}^* = -S\omega_{Г} / k_{SV}. \quad (10)$$

Необхідний кут φ_{BT}^* визначається за тою самою методикою, що і $\varphi_{Г.Т}^*$.

Необхідний кут приблизно можна обчислити:

$$\varphi_{BT}^* = -S\omega_B / k_{SV}, \quad (11)$$

де ω_B , $\omega_{Г}$ – кутові швидкості по лінії візування S у вертикальній і горизонтальній площинах відповідно. Вирази (10) і (11) являють собою алгоритми роботи бортового обчислювача при визначенні $\varphi_{Г.Т}^*$ і $\varphi_{B.Т}^*$.

Таким чином, під час рятування людей з судна, що терпить лихо, доцільно використовувати авіаційні засоби порятунку, що є ефективними в цьому випадку та використовувати технічні засоби порятунку людей. Отже для проведення операції рятування людей на морі можна застосовувати метод прямого зближення. Для надання допомоги судну, що дрейфує та рухається прямолінійно з постійною швидкістю, доцільно використовувати метод зближення з найдоцільнішою точкою зустрічі.

При зближенні з аварійним судном, що маневрує, найвигідніше зближатися методом пропорційної навігації [8].

У цьому випадку керуючі впливи залежать від кутової швидкості обертання лінії візування S :

$$\left. \begin{aligned} U_{\Gamma} &= k_{\text{пн}} \dot{\varphi}_{\Gamma, \Gamma}^* \\ U_{\text{В}} &= k_{\text{пн}} \dot{\varphi}_{\text{ВТ}}^* \end{aligned} \right\}, \quad (12)$$

де $k_{\text{пн}}$ – коефіцієнт пропорційної навігації (зближення); $\dot{\varphi}_{\Gamma, \Gamma}^*$ і $\dot{\varphi}_{\text{ВТ}}^*$ – проекції кутової швидкості лінії S на горизонтальну та вертикальну площини відповідно.

Проекції кутової швидкості лінії візування ω_s вимірюються відповідними датчиками кутової швидкості $ДКШ_{\Gamma}$ і $ДКШ_{\text{В}}$ та вносяться у вигляді виправлень у систему керування та стабілізації (рис. 2).

Таким чином, при рятуванні суден, що терплять лихо на морі та дрейфують під впливом зовнішніх факторів, скоротити час прибуття повітряного судна у точку зустрічі можна введенням у закон керування відповідних складових, що коригують рух рятувального повітряного судна по найвигіднішій траєкторії зближення (рис. 3).

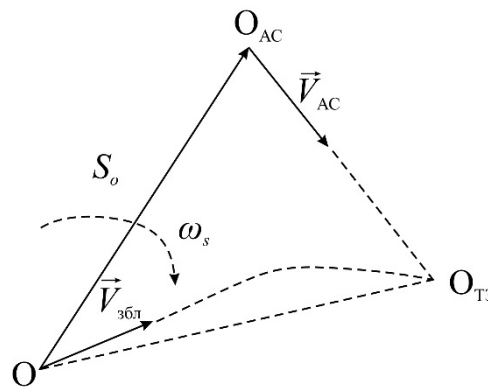


Рисунок 3 – Траєкторія зближення в точку зустрічі повітряного судна $O_{\text{ТЗ}}$ методом пропорційної навігації

Типовими методами зближення рятувального повітряного судна з аварійним слід уважати: для неманевреного дрейфу з постійною швидкістю – метод зближення з найвигіднішою точкою зустрічі; для аварійного судна, що маневрує, – метод пропорційного зближення (навігації).

Другий сценарій результату досліджень: синтез методів зближення морських засобів рятування на воді та алгоритмів траєкторного керування.

У разі виникнення аварійної ситуації на морі починає працювати єдина система пошуку та рятування на морі в Україні. Залежно від обстановки, яка супроводжує аварійну ситуацію та швидкості її розвитку, в процесі порятунку застосовуються авіаційні або морські засоби рятування, а в разі високої динаміки розвитку аварійної ситуації можуть використовуватися і ті й інші засоби одночасно або послідовно. Траєкторне зближення авіаційних засобів і алгоритм керування було розглянуте вище.

Проаналізуємо методи зближення морських суден з аварійним об'єктом і виберемо типові з них.

У цьому випадку, з урахуванням того, що метод паралельного зближення є окремим випадком методу пропорційної навігації також можуть застосовуватися три методи зближення [9]:

- метод прямого зближення;
- метод зближення з найвигіднішою точкою випередження;
- метод пропорційного зближення (навігації).

Метод прямого зближення суттєво не відрізняється від методу зближення ПС із аварійним судном. Він характерний тим, що капітан судна-рятувальника повинен утримувати поздовжню вісь свого судна постійно спрямованою на судно, яке рятує. Очевидно, такого добитися вкрай складно при зближенні з об'єктом, що рухається. Метод застосовується тільки при зближенні з нерухомим об'єктом (людьми на воді та ін.).

Метод зближення з найвигіднішою точкою зустрічі аналогічний зближенню за цим методом ПС із судном, що терпить лихо. Однак, ураховуючи відносно малу швидкість дрейфу аварійного судна, цей метод застосовуємо для зближення з об'єктом на великих відстанях – рух судна-рятувальника по маршруту на його лінійних відрізках. Вимогою до системи прямування судна по лінійному відрізку маршруту є точне визначення часу початку повороту на новий відрізок. Ця вимога може бути виконана в разі використання сучасних методів прогнозу маневру судна-рятувальника.

Критерієм оптимальності керування курсом є функціонал, що враховує дисперсію ризику та дисперсію перекладання керма [6, 7]:

$$J = V_{ар}(\Psi) + P V_{ар}(\beta),$$

де $V_{ар}(\Psi)$ і $P V_{ар}(\beta)$ – дисперсія кута ризику та кутів перекладання керма відповідно; P – ваговий коефіцієнт.

Загалом закон перекладання керма у роботі визначається:

$$\beta_u = k_p \Psi + k_d \dot{\Psi} + k_i \int_{t_1}^{t_2} \Psi dt, \quad (13)$$

де k_p , k_d , k_i – коефіцієнти підсилення пропорційної, диференціюючої та інтегруючої ланок відповідно.

Аналіз досвіду керування суднами показує, що такий метод зближення використовується при зближенні з неманевреними малорухомими об'єктами.

Пропорційне зближення судна-рятувальника з аварійним маневруючим об'єктом застосовується при маневруванні судна-рятувальника, що зближується з аварійним маневруючим об'єктом задля скорочення часу (шляху) під час зближення t_j .

Рівняння ризику у спрощеному вигляді запишемо так [7]:

$$\tau_1 \dot{\Psi} \pm \Psi = k_1 \beta, \quad (14)$$

або з урахуванням, що $\dot{\Psi} \approx \omega_{\Psi}$ маємо

$$\tau_1 \omega_{\Psi} \pm \omega_{\Psi} = k_1 \beta, \quad (15)$$

де τ_1 – стала часу судна; k_1 – коефіцієнт передачі за керуючим впливом, знак «плюс» у формулі (15) відповідає стійким на курсі суднам, знак «мінус» – нестійким.

Критерій оптимальності для такого закону керування запишемо у вигляді:

$$J = V_{ар}(\Delta U) = \min, \quad (16)$$

де $V_{ар}(\Delta U)$ – дисперсія коригувань курсу.

На поточне значення бічного відхилення судна Y від лінії шляху накладається обмеження: $Y < Y_{доп}$.

Крім критерію (16), якість корекції траєкторії зближення визначається рівнем статичної похибки утримання судна на маршруті (рис. 4). Визначимо маршрутні

координати системи. Зв'язок між географічними φ , λ і маршрутними Y , S координатами судна на активному відрізку маршруту АВ (рис. 4) опишемо залежностями [7]:

$$\begin{cases} \Delta\varphi = \varphi - \varphi_A; \\ \Delta\omega = (\lambda - \lambda_A) \cos[0,5(\lambda - \lambda_A)] \end{cases} \quad (17)$$

де φ_A , λ_A – широта й довгота початкової точки активного відрізка маршруту.

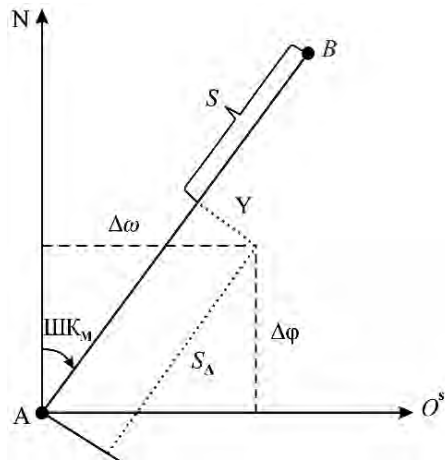


Рисунок 4 – Маршрутні координати судна-рятувальника

Маршрутні координати судна розраховуються по його прямокутних координатах $\Delta\omega$, $\Delta\varphi$:

$$\begin{cases} \lambda = \Delta\omega \cos ШК_m - \Delta\varphi \sin ШК_m; \\ S_A = \Delta\omega \sin ШК_m - \Delta\varphi \cos ШК_m, \end{cases} \quad (18)$$

де $ШК_m$ – шляховий кут (магнітний).

Відстань по відрізку маршруту до шляхової точки B дорівнює:

$$S = S_{AB} - S_A,$$

де S_{AB} – довжина відрізка маршруту.

Стабілізацію судна на відрізку шляху можна здійснити двоконтурною схемою (рис. 5), яка включає регулювальний курс обладнання (АР) і систему, що керує рухом по траєкторії (Track control system) і відрізняється від відомих схем введенням в неї додаткової корекції, що враховує метод зближення.

Від позиційного датчика (приймач-індикатор однієї із супутникових систем: GPS, Глонас, DGPS, ДГлонас) у Track control system надходять дані про координати судна й параметри руху (φ , λ , ШК, V), також у цю систему від модуля планування шляхів вводяться дані запланованого маршруту та методу зближення.

У разі втримання судна на відрізку маршруту заданий алгоритм коригування курсу (стабілізації) можна визначити в такий спосіб [7]:

$$k_{ui} = k_A + U_i. \quad (19)$$

У виразі (19) k_A – ШК_м маршрутний шляховий кут активного відрізка маршруту; U_i – курсова поправка до k_A . Пропорційно-інтегральний закон вироблення виправлень до k_A при пропорційному методі зближення буде таким:

$$U_i = r_n Y_i + r_u \int_{t_1}^{t_2} Y_i dt = U_n + U_k, \quad (20)$$

де r_n , r_u – коефіцієнти пропорційної U_n та інтегральної U_u складових закону коригування.

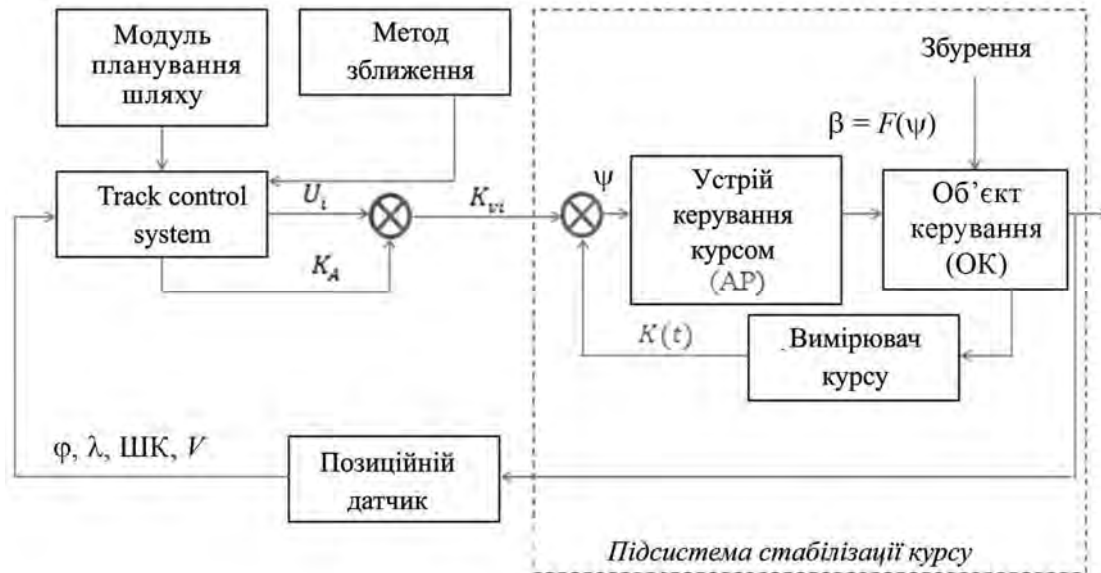


Рисунок 5 – Схема стабілізації судна на відрізках маршруту

Складова закону коригування (20) $U_n = r_n Y_i$ є основним керуванням, що забезпечує пропорційне повернення на лінію шляху.

Отже, у разі виникнення аварійної ситуації на морі, залежно від аварії і швидкості та характеру її розвитку, для рятувальних робіт можуть залучатися:

- для порятунку судна – авіаційні й морські засоби рятування, які використовують метод зближення з найвигіднішою точкою упередження при прямолінійному дрейфі з малою швидкістю або методу пропорційної навігації при зближенні з аварійним судном, що маневрує;
- для рятування людей на воді можуть залучатися авіаційні засоби рятування та евакуації, а також найближчі до місця аварії морські засоби, що наводяться за методом прямого зближення.

Ураховуючи швидкоплинність розвитку аварійної ситуації й трудомісткість процесу рятування на морі, усі види робіт з ліквідації наслідків аварії потребують автоматизації, а також скорочення часу, що витрачається на подолання відстані між судном-рятувальником і судном, яке рятує [10].

Висновки. Проведено синтез методів зближення авіаційних та морських засобів пошуку та рятування на морі із аварійним судном та алгоритмів траекторного керування ними. Встановлено, що найбільш ефективним є зближення за методом пропорційної навігації з аварійним судном, яке зазнає швидкісний дрейф з маневруванням та за методом зближення з найвигіднішою точкою випередження, якщо аварійне судно дрейфує прямолінійно з незначною швидкістю, що дало можливість рекомендувати розробникам систем керування судном додати до таких систем режим автоматизованого вводу метода зближення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Про відновлення єдиної системи пошуку та рятування на морі : постанова Кабінету Міністрів України № 158 від 24 лютого 2016 р. Київ, 2016.
2. Наставление по международному авиационному и морскому поиску и спасанию (ИАМСАР). Санкт-Петербург : ЦНИИМФ, 2013. Том 2. 552 с.
3. Руководство по международному авиационному и морскому поиску и спасанию. Лондон: ИМО, 2013. Т. I. 150 с. Т. II. 522 с.
4. Международная Конвенция по охране человеческой жизни на море 1974 года СОЛАС (текст, измененный Протоколом 1988 года к ней, с поправками). Санкт-Петербург : ЦНИИМФ, 2010. 992 с.
5. Сичкарев В. И. Использование в судовождении гидрометеорологической информации. Новосибирск : ГАВТ, 1999. 175 с.
6. Казак В. М. Системні методи відновлення живучості літальних апаратів в особливих ситуаціях у польоті. Київ : НАУ-друк, 2010. 284 с.
7. Вагущенко Л. Л., Цымбал Н. Н. Системы автоматического управления движением судна. Одесса : Ластар, 2002. 310 с.
8. Казак В. Н., Бояринов И. А. Оценивание параметров математической модели беспилотного летательного аппарата. Проблемы експлуатації та надійності авіаційної техніки : збірник наукових праць. Київ : КМУЦА, 1998. С. 67–71.
9. Ермолаев Г. Г., Зотеев Е. С. Основы морского судовождения. Москва : Транспорт, 1988. 265 с.
10. Березин С. Я., Тетюев Б. А. Системы автоматического управления движением судна по курсу. Ленинград : Судостроение, 1990. 256 с.

REFERENCES

1. Pro vidnovlennia yedynoi systemy poshuku ta riatuvannia na mori : postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy # 158 vid 24 liutoho 2016. Kyiv.
2. Nastavlenie po mezhdunarodnomu aviacionnomu i morskому poisku i spasaniyu (IAMSAR). (2013). Sankt-Peterburg : CNIIMF. Vol. 2.
3. Rukovodstvo po mezhdunarodnomu aviacionnomu i morskому poisku i spasaniyu. (2013). London: IMO. Vol. I. Vol. II.
4. Mezhdunarodnaya Konvenciya po okhrane chelovecheskoj zhizni na more 1974 goda SOLAS (tekst, izmenennihj Protokolom 1988 goda k nej, s popravkami). (2010). Sankt-Peterburg : CNIIMF.
5. Sichkarev V. I. (1999). *Ispoljzovanie v sudovozhdenii gidrometeorologicheskoy informacii*. Novosibirsk : GAVT.
6. Kazak V. M. (2010). *Systemni metody vidnovlennia zhyvuchosti litalnykh aparativ v osoblyvykh situatsiiakh u poloti*. Kyiv : NAU-druk.
7. Vaguthenko L. L. & Cihmbal N. N. (2002). *Sistemih avtomaticheskogo upravleniya dvizheniem sudna*. Odessa : Lastar.
8. Kazak V. N., Boyarinov I. A. (1998). Ocenivanie parametrov matematicheskoy modeli bespilotnogo letatel'nogo apparata. *Problemy ekspluatatsii ta nadiinosti aviatsiinoi tekhniki : zbirnyk naukovykh prats*. Kyiv : KMUTSA, 67–71.
9. Ermolaev G. G., Zoteev E. S. (1988). *Osnovih morskogo sudovozhdeniya*. Moskva : Transport.
10. Berezin S. Ya., Tetyuev B. A. (1990). *Sistemih avtomaticheskogo upravleniya dvizheniem sudna po kursu*. Leningrad : Sudostroenie.

Селиванов С. Е., Годованюк С. П. МЕТОДЫ СБЛИЖЕНИЯ ВОЗДУШНОГО ИЛИ МОРСКОГО СУДНА С ДРУГИМ СУДНОМ, И АЛГОРИТМОВ ТРАЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ИМИ

Согласно стандарта высшего образования Украины: первый (бакалаврский) уровень, область знаний 27 – Транспорт, по специальности 275 – Транспортные технологии к специальным (профессиональным, предметным) компетенциям относится «способность организовывать взаимодействие видов транспорта», поэтому в работе приводятся результаты научных исследований по указанной теме. Необходимость взаимодействия между морским и воздушным судном или морским судном с другим, может возникнуть в тех случаях, если одно из них или находится в аварийной ситуации, или принимает участие в операциях SAR (search and rescue – поиск и спасения). Для улучшения характеристик траектории управляемого движения спасательных средств в точку встречи с аварийным судном воздушного или морского судна, предложено вводить в систему управления и стабилизации спасательного судна алгоритм (метод) сближения суден. Анализ опыта управления суднами показывает, что метод сближения используется при сближении с неманевренными малоподвижными объектами. Рассмотренный алгоритм прямого сближения при командном управлении воздушным судном; метод сближения с наиболее выгодной точкой опережения во время штурвального управления воздушным судном; синтез методов сближения морских средств спасания на воде и алгоритмов траекторного управления; проанализированные методы сближения морских судов с аварийным объектом; показано, что метод прямого сближения существенно не отличается от метода сближения воздушного судна с аварийным судном; приведена схема стабилизации судна на отрезках маршрута.

Ключевые слова: синтез методов, методы сближения, воздушное судно, морское судно, спасательное судно, алгоритм траекторного управления, схема стабилизации судна.

Selivanov S. E., Godovanyuk S. P. METHODS OF APPROACHING AN AIRCRAFT OR SEA SHIP WITH ANOTHER VESSEL, AND ALGORITHMS OF THE TRACTOR CONTROL OF THEM

According to the standard of higher education of Ukraine: the first (bachelor's) level, area of knowledge 27 – Transport, in specialty 275 – Transport technologies, special (professional, subject) competencies include "the ability to organize the interaction of modes of transport", therefore, the work provides the results of scientific research on topic. The need for interaction between sea and air ship or sea vessel with another, may occur in cases where one of them is either in an emergency, or takes part in SAR (search and rescue) operations. To improve the characteristics of the trajectory of the controlled movement of life-saving appliances to the point of meeting with the damaged aircraft or sea vessel, it is proposed to introduce an algorithm (method) of approaching ships into the control and stabilization system of the rescue vessel. Analysis of the experience of ship control shows that the rendezvous method is used when rendezvous with non-maneuverable sedentary objects. The considered algorithm of direct approach for command control of the aircraft; the method of approaching the most advantageous lead point during steering control of the aircraft; synthesis of methods for approaching marine rescue equipment on water and algorithms for traction control; analyzed methods of approaching ships with an emergency facility; it is shown that the method of direct rendezvous does not differ significantly from the method of rendezvous between an air craft and an emergency ship; the scheme of vessel stabilization on the route sections is shown.

Keywords: synthesis of methods, methods of rendezvous, aircraft, sea-going vessel, rescue vessel, algorithm, trajectory control algorithm, vessel stabilization scheme.

© Селіванов С. Е., Годованюк С. П.

Статтю прийнято
до редакції 26.08.20

БАЛАСТУВАННЯ АВАРІЙНОГО СУДНА ПРИ ПОСАДЦІ НА МІЛИНУ

Терлич С. В., к.т.н., доцент кафедри суднобудування та ремонту суден Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, e-mail: slavus.ter@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6044-3087

Реалізується методика баластування аварійного судна при посадці на ґрунт та запобігання його викидання силами хвиль та вітру на мілину. Мета досягнута шляхом створення та аналізу математичної моделі аварійного судна, яке підлягає баластуванню і в той же час дрейфує під впливом дій вітру та хвиль в умовах мілководдя та із високою ймовірністю викидання судна на мілину. Розглянуто математичну модель позиціонування судна при контакті із дном акваторії шляхом прийняття та переміщення рідкого баласту вздовж корпусу. Запропоновано розрахункові залежності та номограми для визначення раціональної кількості баласту, його позиціонування та переміщення. Надано рекомендації щодо запобігання дрейфу судна під час аварійного контакту із ґрунтом. З'ясовано, що запропоновані графічні залежності підвищують ефективність запобігання дрейфу аварійного судна та сприятимуть підготовці екіпажу судна до погіршення погодних умов, зменшенню ступеню пошкодження та об'єму рятувальних робіт.

Ключові слова: аварійне судно, посадка на мілину, мілководдя, хитавиця суден.

DOI: 10.33815/2313-4763.2020.2.23.050–057

Постановка задачі. Баластування аварійного судна після непередбаченої посадки на ґрунт відоме як найбільш ефективний спосіб запобігання подальшого викидання судна на мілину. Досвід морської практики [1, 2] та відповідні нормативні документи [3, 4, 5] визначають якісну сторону поставленого питання. У зв'язку з цим склалися твердження: якщо судно сіло на мілину, то прийняття рідкого баласту в будь-якій кількості створює сприятливу дію. Інший варіант – баластувати судно до припинення дрейфу, а при його поновленні продовжити приймання баласту. Зрозуміло, що такий підхід не сприяє стабілізації аварійної ситуації і крім того вносить невпевненість та неоднозначність дій екіпажів аварійних суден.

Актуальність дослідження полягає у тому, що кількісна регламентація баластування дозволить подолати відмічені недоліки та більш успішно використовувати цей метод при виконанні аварійно-рятувальних робіт.

Отримана **мета** досягнута шляхом створення та аналізу математичної моделі аварійного судна, яке підлягає баластуванню і в той же час дрейфує під впливом дій вітру та хвиль в умовах мілководдя та із високою ймовірністю викидання судна на мілину.

Прийнята гідродинамічна модель процесу викидання судна на мілину передбачає відповідну схематизацію фізичних явищ. У якості **наукового методу** прийнято положення лінійної гідродинамічної теорії хитавиці в умовах мілководдя згідно методики, запропонованою у роботі [6]. Силкові впливи вітру та хвиль на судно, яке дрейфує в зоні мілководдя приводить до періодичних ударів корпусу об ґрунт.

Аналіз досліджень та публікацій за темою статті. Вплив мілководдя на приєднані маси $\lambda_{22}, \lambda_{33}$ площинного контуру отримано шляхом осереднення залежностей Т. Н. Хавелока, Ю. М. Гулієва, Д. Прохаски [7, 8] для шпангоутів із коефіцієнтом повноти від 0,7 до 0,9. Інтерполяційна залежність цього осереднення виражається коефіцієнтом:

$$\begin{aligned} k_{22} &= 1 + 2,5 \left(\frac{d}{H} \right)^{2,35}, \\ k_{33} &= 1 + 1,2 \left(\frac{d}{H} \right)^{2,40}, \end{aligned} \quad (1)$$

де d – осадка судна, м; H – глибина акваторії, м.

В той же час залежності, які розглядаються отримано із дослідів вертикальної вібрації контурів на незбуреній вільній поверхні, тому не враховують параметрів хвилювання. Для наближеного оцінювання приєднаних мас судна при вертикальних коливаннях використовувались теоретичні залежності Д. Воссерса [9] для круглого циліндру, який здійснює коливання на мілкій воді, а також результати дослідження хитавиці великотоннажних суден на портових акваторіях, наведених В.В. Бурячком [10]. Для повністю розвинутого хвилювання ця залежність апроксимується виразом:

$$\varepsilon_{33}^h = \left(e^{\frac{d}{H}} - 0,45 \right) \left(\frac{\sigma_0^2 B}{2g} \right)^{0,1 \left(1 + \frac{d}{H} \right)}, \quad (2)$$

де σ_0 – частота хвилювання, с^{-1} ; B – розрахункова ширина судна, м; $g = 10 \text{ м/с}^2$ – прискорення сили тяжіння.

Результати дослідження. На мілководді за мірою зменшення відносної глибини $\frac{d}{H}$ істотно збільшуються приєднані маси корпусу судна $\lambda_{22}, \lambda_{33}$. Починає істотно домінувати вплив обтікання опорних площадок корпусу із нерівностями на міліні та кінцевостей корпусу судна. Гіпотеза площинних перерізів стає неприпустимою. Теоретичні та експериментальні залежності доводять, що:

$$\begin{cases} k_{22} \rightarrow \infty \\ k_{33} \rightarrow \infty \end{cases} \Bigg|_{\frac{d}{H} \rightarrow 1}, \quad (3)$$

у зв'язку з цим для збереження фізичного смислу коефіцієнтів необхідно задати їх числові значення. Враховуючи, що теоретичні залежності приєднаних мас $\lambda_{22}, \lambda_{33}$ від відносної глибини $\frac{d}{H}$, рівних 1,1...1,25, є справедливими і для реальних умов ділянка корпусу до контакту з ґрунтом екстраполюється ступеневою функцією, яка апроксимує цю залежність. Після дослідження максимумів величини приєднаних мас $\lambda_{22}, \lambda_{33}$ приймаються як константи. На базі обробки експериментальних даних В. Г. Павленко [11], а також досліджень Інституту гідромеханіки НАН України [12] для моделей побудованих суден та еліпсоїда обертання [2] зростання приєднаних мас при поперечно-вертикальній хитавиці більш точно у порівнянні із (1) можна апроксимувати як:

$$\begin{aligned} k_{22} &= 1,22 + 2,71 \left(\frac{d}{H} \right)^{2,38} \\ k_{33} &= 1,31 + 1,24 \left(\frac{d}{H} \right)^{2,47} \end{aligned} \quad (4)$$

Залежність приєднаних мас від частоти хитавиці приймаються аналогічно із залежністю (2):

$$\varepsilon_{22}^h = \varepsilon_{33}^h \frac{k_{22}}{k_{33}}. \quad (5)$$

Для мілководдя відношення $\varepsilon_{22}^h = \frac{\lambda_{33}^h}{\lambda_{33}^\infty}$ виявилось близьким до відношення коефіцієнтів хвильового демпфування $\frac{\mu_{33}^h}{\mu_{33}^\infty}$ [1]. У зв'язку із відсутністю даних про вплив

мілководдя на коефіцієнт демпфування поперечно-вертикальної хитавиці, вважається справедливим рівність:

$$\frac{\lambda_{22}^h}{\lambda_{22}^\infty} = \frac{\mu_{33}^h}{\mu_{33}^\infty}. \quad (6)$$

Із виходом на мілководдя морські хвилі видозмінюються. Довжини та висоти хвиль змінюються таким чином, що крупні хвилі зменшуються по довжині, а малі – зростають із висотою. Зростання висоти гребня та одночасне зменшення глибини западення враховується поправкою:

$$\delta h = 0,15 \left[\frac{h}{H} \left(\frac{\lambda}{H} \right)^2 \right]^{0,1} \xi_A, \quad (7)$$

де λ – довжина хвилі, м; h – висота хвилі, м; ξ_A – абсциса хвилі, м.

Враховуючи вищенаведене, а також рівняння для гідродинамічних сил [9], складено систему рівнянь, яка описує процес викидання судна на мілину та відображає вплив баластування аварійного судна на даний процес. При цьому використано вже відомі залежності висоти хвилі від її частоти [6], а також застосовано рухому систему координат, яка використовується у кораблебудуванні (рис. 1). Тут і далі система $(x; y; z)$ – рухома система координат відносно центру тяжіння судна G . Система $(\xi; \eta; \zeta)$ є нерухомою системою координат відповідно до центру коливань судна O під час хитавиці.

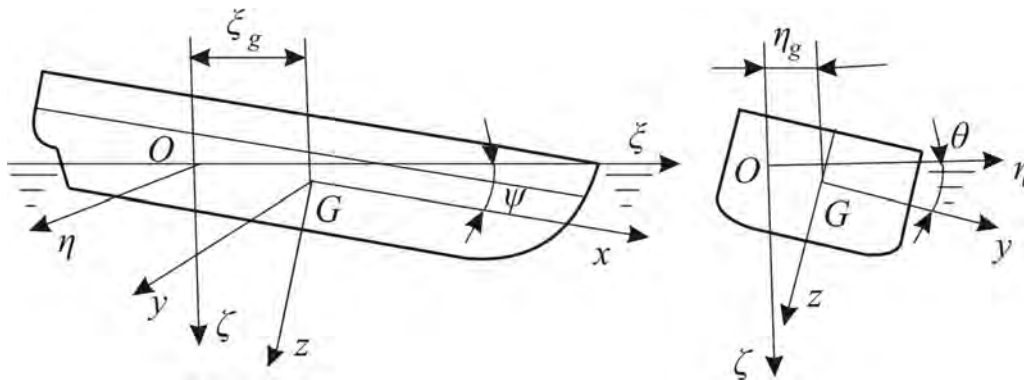


Рисунок 1 – Загальнокорабельна система координат при хитавиці судна

$$\begin{cases} (D + \lambda_{33}^h + P_B) \ddot{\xi}_g + \mu_{33}^h \dot{\xi}_g + \gamma S_0 \xi_g = \\ = \gamma S_0 (f_1 x_1^+ - f_2 x_2^-) (\xi_A e^{i\sigma_0 t} + \Delta h) - \sigma_0 \cdot c_w \cdot \text{cth}(k_0 \cdot H) \times (\lambda_{33}^h \sigma_0 - i \mu_{33}^h) (\xi_A e^{i\sigma_0 t} + \delta h); \\ (D + \lambda_{22}^h + P_B) \ddot{\eta}_g + \mu_{22}^h \dot{\eta}_g = \\ = i \gamma S_0 b_2 (\xi_A e^{i\sigma_0 t} + \delta h) + R_{ya} - R_{yr} + \sigma_0 \cdot \text{cth}(k_0 \cdot H \cdot c_w) \times (\mu_{22}^h + i \sigma_0 \lambda_{22}^h) (\xi_A e^{i\sigma_0 t} + \delta h); \\ \varepsilon_{33}^h = \left(e^{\frac{d}{H}} - 0,45 \right) \left(\frac{\sigma_0^2 B}{2g} \right)^{0,1 \left(1 + \frac{d}{H} \right)}; \quad \lambda_{33}^h = \lambda_{33}^\infty \varepsilon_{33}^h; \quad \lambda_{22}^h = \lambda_{22}^\infty \varepsilon_{22}^h; \quad \mu_{33}^h = \mu_{33}^\infty \varepsilon_{33}^h; \quad \mu_{22}^h = \mu_{22}^\infty \varepsilon_{22}^h; \\ \Delta h = 0,15 \left[\frac{h}{H} \left(\frac{\lambda}{H} \right)^2 \right]^{0,1} \xi_A; \\ \sigma_0 = 1,74 h^{-0,4}; \\ H = H_0 - \eta_g \text{tg} \alpha; \end{cases} \quad (8)$$

де перший вираз системи – рівняння вертикальної хитавиці; другий – рівняння поперечно-горизонтальної хитавиці; третій – змінення приєднаних мас та коефіцієнтів демпфування;

Із зростанням ступеня баластування $\frac{P_B}{D}$ від 0 до 0,8 максимум швидкості зіткнення зміщується від $\frac{d}{H}$ рівного 0,92 до 1,0 та зростає з 0,58 до 0,67 ξ_A . Таким чином, баластування в процесі дрейфу доцільно проводити лише після досягнення $\frac{d}{H}$ значення 1,2, тим самим запобігає зріст пошкоджень корпусу у порівнянні із ударами о ґрунт без баласту. Після розгляду граничних параметрів судна, яке випрошено на міліну при різних висотах хвиль та кількості прийнятого баласту побудовано діаграму (рис. 2). Робоче поле діаграми обмежується прямою $\frac{d}{H_{кр}}$, яка характеризує зону руйнування хвилями.

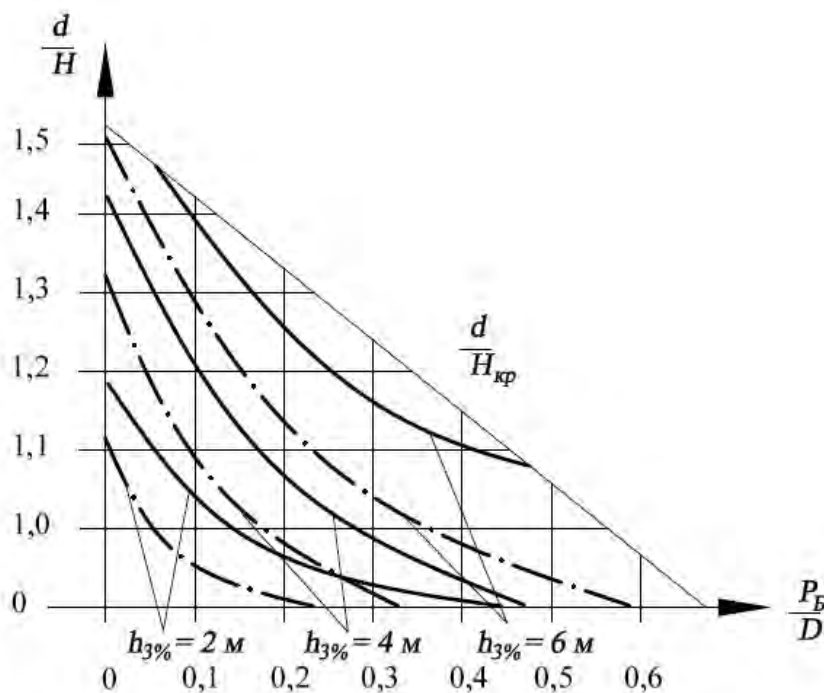


Рисунок 2 – Діаграма потрібного баластування судна:

————— для буксирних та промислових суден, - - - - - для транспортних суден

При визначенні потрібної кількості баласту для запобігання дрейфу необхідно «увійти» в діаграму із величиною відносної аварійної осадки $\frac{d}{H}$ та інтерпольованим значенням висоти хвилі, яка спостерігається або очікується. Величина, яка розраховується знімається із точки їх перетину з вісі відносного баласту, як частина водотоннажності при осадці d .

Аналіз отриманих результатів. Порівняння результатів використання діаграми із даними фактичних баластувань доводить, що фактично прийнята кількість баласту на судах, які потрапили у аварію без вантажу – надлишкова, а на судах у вантажі – недостатня. Урахування динаміки у вказаних задачах знижує величину необхідного баласту приблизно в 1,5 рази при використанні у розрахунках хвиль із 3 % забезпеченістю.

Таким чином, наведена діаграма дозволяє визначити мінімальну кількість баласту, необхідну для запобігання дрейфу судна на міліні. Прийняття меншої кількості баласту недоцільно.

Практичний приклад. «Аварійне судно «сидить» на кам'янистому ґрунті, днище має великі пошкодження, забаластовано всі вільні танки, в трюмах знаходиться вантаж, який псується від солоної води, отримано штормове попередження», – дуже багато

подібних ситуацій описано на інтернет-порталах у науковій, довідковій та художній літературі [11–17].

Зрозуміло, що для прийняття раціонального рішення екіпажу необхідно знати мінімально можливу кількість рідкого баласту для того, щоб рішуче прийняти забортну воду в один трюм згідно розрахунку та не чекати, доки це «зробить» стихія через ушкоджене днище з усіма відсіками.

Висновки з перспективами. Використання запропонованої діаграми підвищить ефективність використання даного способу запобігання дрейфу аварійного судна, буде сприяти завчасній його підготовці до погіршення погодних умов, зменшенню ступеня пошкодження корпусу та об'єму аварійно-рятувальних робіт.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Яркін П. И. Управление судном. Одесса : ОНМА, 2006. 156 с.
2. Снопков В. И. Управление судном. учеб. для ВУЗзов. Санкт-Петербург : АНО НПО «Профессионал», 2004. 536 с.
3. Руководство по техническому наблюдению за судами в эксплуатации. Санкт-Петербург : РМРС, 2003. 226 с.
4. СОЛАС 74. Международная конвенция по охране человеческой жизни на море. Санкт-Петербург : ЦНИИМФ, 2015. 1088 с.
5. Кодекс торговельного мореплавства України. *Інтернет-ресурс*. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/176/95-%D0%B2%D1%80#Text>
6. Борисов Р. В., Семенова В. Ю. Качка корабля. Санкт-Петербург : СпБГМТУ, 2006. 94 с.
7. Гулиев, Ю.М. Гребные винты. Москва : Морской транспорт, 1961. 134 с.
8. Сизов В. Г. Об одном способе улучшения формы судна. *Вестник ОНМУ*. Одесса : ОНМУ, 2006. Вып. 19. С. 14–19.
9. Vossers G. Fundamentals of the Behavior of Ships in Waves. JSP. 1961. P. 13–28.
10. Бурячок В. В. К теории качки крупнотоннажных судов на портовых акваториях. Москва : Труды Союзморниипроект, 1982. 212 с.
11. Павленко В. Г. Ходкость и управляемость судов. Москва : Морской транспорт, 1991. 397 с.
12. Інститут гідромеханіки НАН України. *Офіційний сайт*. URL : <http://www.hydronech.com.ua/rus/activity.html>.
13. Аварии и происшествия. *Інтернет-ресурс*. URL : <https://mortrans.info/allnews>.
14. Родионов А. А., Аунг Куи Мьинт. Численное моделирование аварийного разрушения днищевого перекрытия при контакте с подводным камнем *В сборнике «Труды Крыловского государственного научного центра»*. Вып. 82 (366). Санкт-Петербург, 2014. С. 31–36.
15. Муромов И. Сто великих кораблекрушений. Москва : Вече, 2015. 321 с.
16. Олейник Е. А. Анализ причин кораблекрушений, безопасность гражданского судоходства. *Актуальные проблемы развития судоходства и транспорта в азиатско-тихоокеанском регионе : материалы Международной научно-технической конференции*. Владивосток : ФГАОУ ВО ДальФУ, 2019. С. 36–40.
17. Труднев С. Ю., Нистор А. С. Анализ аварийности судов рыбопромыслового флота дальнего востока. *Техническая эксплуатация водного транспорта : проблемы и пути развития*. Петропавловск-Камчатский : КГУ, 2018. С. 21–28.

REFERENCES

1. Yarkin P. I. (2006). *Upravlenie sudnom*. Odessa : ONMA.
2. Snopkov V. I. (2004). *Upravlenie sudnom : ucheb. dlya VUZzov*. Sankt-Peterburg : ANO NPO «Professional».

3. *Rukovodstvo po tekhnicheskomu nablyudeniyu za sudami v ehkspluatacii.* (2003). Sankt-Peterburg : RMRS.
4. SOLAS 74. (2015). Mezhdunarodnaya konvenciya po okhrane chelovecheskoy zhidni na more. Sankt-Peterburg : CNIIMF.
5. Kodeks torhivelnogo moreplavstva Ukrainy. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/176/95-%D0%B2%D1%80#Text>
6. Borisov R. V., Semenova V. Yu. (2006). *Kachka korablya.* Sankt-Peterburg : SpBGMTU.
7. Guliev, Yu.M. (1961). *Grebnihe vintih.* Moskva : Morskoy transport.
8. Sizov V. G. (2006). Ob odnom sposobe uluchsheniya formih sudna. *Vestnik ONMU.* Odessa : ONMU. Vol. 19. 14–19.
9. Vossers G. (1961). Fundamentals of the Behavior of Ships in Waves. *JSP.* 13–28.
10. Buryachok V. V. (1982). *K teorii kachki krupnotonnazhnikh sudov na portovihkh akvatoriyakh.* Moskva : Trudih Soyuzmorniiproekt.
11. Pavlenko V. G. (1991). *Khodkostj i upravlyaemostj sudov.* Moskva : Morskoy transport.
12. Institut gidromekhaniki NAN Ukrainy. Retrieved from <http://www.hydrotech.com.ua/rus/activity.html>.
13. Avarii i proshestviya. Retrieved from <https://mortrans.info/allnews>.
14. Rodionov A. A., Aung Kui Mjint. (2014). Chislennoe modelirovanie avariynogo razrusheniya dnithevoogo perekrihtiya pri kontakte s podvodnim kamnem V sbornike «Trudih Krihlovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra». Sankt-Peterburg. Vol. 82 (366). 31–36.
15. Muromov I. (2015). *Sto velikih korablekrusheniyj.* Moskva : Veche.
16. Oleyjnik E. A. (2019). Analiz prichin korablekrusheniyj, bezopasnostj grazhdanskogo sudokhodstva. *Aktualjnihe problemih razvitiya sudokhodstva i transporta v aziatsko-tikhookeanskom regione : materialih Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii.* Vladivostok : FGAOU VO DaljFU, 36–40.
17. Trudnev S. Yu., Nistor A. S. (2018). Analiz avariynosti sudov rihbopromihslavogo flota daljnego vostoka. *Tekhnicheskaya ehkspluatsiya vodnogo transporta : problemih i puti razvitiya.* Petropavlovsk-Kamchatskiy : KGU, 21–28.

Терлыч С. В. БАЛЛАСТИРОВКА АВАРИЙНОГО СУДНА ПРИ ПОСАДКЕ НА МЕЛЬ

Реализуется методика балластировки аварийного судна при посадке на грунт и предотвращения выброса силами волн и ветра на мель. Цель достигнута путем создания и анализа математической модели аварийного судна, подлежащего балластировке и в то же время дрейфует под влиянием действий ветра и волн в условиях мелководья и с высокой вероятностью выбрасывания судна на мель. Рассмотрена математическая модель позиционирования судна при контакте с дном акватории путем принятия и перемещения жидкого балласта вдоль корпуса. Предложены расчетные зависимости и номограммы для определения рационального количества балласта, его позиционирование и перемещение. Даны рекомендации по предотвращению дрейфа судна во время аварийного контакта с грунтом. Выяснено, что предложенные графические зависимости повысят эффективность предотвращения дрейфа аварийного судна и способствовать подготовке экипажа судна к ухудшению погодных условий, уменьшению степени повреждений и объема спасательных работ. Ключевые слова: аварийное судно, посадка на мель, мелководье, качка судов.

Ключевые слова: аварийное судно, посадка на мель, мелководье, качка судов.

Terlych S. THE INFORMATION TECHNOLOGIES APPLICATIONS IMPROVING IN SHIP AND SHIPS CONSTRUCTIONS DURABILITY AND VIBRATION.

The technique of ballasting the damaged vessel when landing on the ground and preventing the ejection of waves and wind forces aground is being implemented. A mathematical model of the positioning of a vessel in contact with the bottom of the water area by taking and moving liquid ballast along the hull is considered. The relevance of the study is that the quantitative regulation of ballasting will overcome the shortcomings and more successfully use this method in the implementation of rescue operations. This fact is achieved by creating and analyzing a mathematical model of an emergency vessel, which is subject to ballasting and at the same time drifts under the influence of wind and waves in shallow water and with a high probability of

throwing the vessel ashore. The adopted hydrodynamic model of the process of throwing a ship aground provides an appropriate schematization of physical phenomena. The force of wind and waves on a vessel drifting in a shallow area leads to periodic hull impacts on the ground. Calculated dependences and nomograms are proposed for determining the rational amount of ballast, its positioning and movement. Recommendations are given for preventing the drift of a vessel during emergency contact with the ground. Recommendations are given for preventing the drift of a vessel during emergency contact with the ground. The proposed graphical dependencies will increase the efficiency of preventing the drift of the damaged vessel and contribute to the preparation of the ship's crew for worsening weather conditions, reducing the degree of damage and the volume of rescue operations. The research results are used in the educational process in training specialists in specialty 135 "Shipbuilding" during the study of the theory of the ship and ship repair items.

Keywords: emergency ship, grounding, shallow water, vessel dynamics.

© Терлич С. В.

Статтю прийнято
до редакції 18.10.20

ІНЖЕНЕРІЯ У ТРАНСПОРТНІЙ ГАЛУЗІ

ENGINEERING IN TRANSPORT INDUSTRY

ОПТИМІЗАЦІЯ ВМІСТУ ІНГРЕДІЄНТІВ ПРИ ФОРМУВАННІ ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ РОБОТИ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

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;

Гусєв В. М., к.т.н., Херсонської державної морської академії, e-mail: v.n.gusev73@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6801-7616;

Кулініч А. Г., аспірант кафедри транспортних технологій Херсонської державної морської академії, e-mail: kulinichandrey77@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6507-8229;

Якущенко С. В., старший викладач кафедри природничо-наукової підготовки Херсонської державної морської академії, e-mail: yakushchenko.sv@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1724-8171;

Житник Д. В., аспірант кафедри транспортних технологій Херсонської державної морської академії, e-mail: danylzhytnyk@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6579-3599

Обґрунтовано необхідність застосування полімерних композитів у виробництві і ремонті деталей та об'єктів у різних галузях промисловості, у тому числі й у водному транспорті. Це зумовлено значною інтенсивністю обсягів перевезення вантажів, збільшенням умов навантаження транспортних засобів, а також їх роботою в умовах впливу агресивних середовищ. При цьому на сьогодні висувають нові вимоги до покращення показників ресурсозбереження деталей транспортних засобів та скорочення термінів ремонтних робіт.

Доведено, що для покращення експлуатаційних характеристик епоксидних композитів у зв'язувач необхідно вводити добавки різної фізичної та хімічної природи за оптимального вмісту. У роботі оптимізовано вміст дисперсних часток синтезованої порошкової титано-алюмінієвої суміші і дискретних вуглецевих волокон, які вводили у зв'язувач для підвищення показників механічних властивостей епоксидних матеріалів.

Мета роботи – методом математичного планування експерименту оптимізувати вміст дисперсного і волокнистого дискретного наповнювачів для захисних покриттів водного транспорту. Методом математичного планування експерименту встановлено оптимальний вміст дисперсного і волокнистого дискретного наповнювачів: порошкова титано-алюмінієва суміш – 0,3...0,5 мас.ч., дискретні вуглецеві волокна – 0,05 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20. Введення до епоксидного зв'язувача таких інгредієнтів дозволяє підвищити показники ударної в'язкості епоксидних композитів до $W = 22,8...23,2$ кДж/м². Проаналізовано, що при збільшенні вмісту порошкової титано-алюмінієвої суміші є можливим додатково підвищувати показники ударної в'язкості матеріалів. Отримані результати дозволяють створити матеріали з поліпшеними у комплексі показниками фізико-механічних властивостей. Розроблені матеріали доцільно використовувати у вигляді захисних покриттів для підвищення ресурсу роботи і ремонту деталей транспортної техніки.

Ключові слова: оптимізація, композит, епоксидна матриця, математичне планування експерименту, рівняння регресії.

DOI: 10.33815/2313-4763.2020.2.23.059–068

Постановка проблеми. На сьогодні приділяють значну увагу напрямку створення нових технологій щодо розробки полімерних композитів, які можна широко застосовувати у виробництві і ремонті деталей та об'єктів у різних галузях промисловості, у тому числі й у водному транспорті. Інтенсивність обсягів перевезення вантажів, збільшення умов навантаження транспортних засобів, повсякчасна робота в умовах впливу агресивних середовищ висувають нові вимоги до покращення показників ресурсозбереження деталей транспортних засобів та скорочення термінів ремонтних робіт. У цьому контексті одними з перспективних, які б відповідали вимогам сучасної транспортної промисловості, є епоксидні композитні матеріали, які за своїми експлуатаційними характеристиками у більшості випадків є кращими порівняно з традиційними металами та сплавами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Авторами [1–5] доведено, що для

покращення експлуатаційних характеристик епоксидних композитів у зв'язувач необхідно вводити добавки різної фізичної та хімічної природи. При цьому актуальним є застосування у вигляді наповнювачів дисперсних часток та дискретних волокон [6, 7]. Використання перших передбачає збільшення показників когезійної міцності матеріалів, при цьому важливе значення має активність поверхні до взаємодії з боковими групами та сегментами макромолекул епоксидного олігомеру. Виходячи з цього, на наш погляд, цікавим є введення у зв'язувач дисперсних часток синтезованої порошкової титано-алюмінієвої суміші наступного складу: Ti (70 %) + Al₃Ti (15 %) + Ti₃AlC₂ (15 %). Наявність наведених вище сполук у структурі добавки дозволить активувати процеси зшивання, що позначиться на властивостях матеріалів. Крім цього, наповнення композитів дискретними вуглецевими волокнами забезпечить додаткове підвищення показників міцності матеріалів, що дозволить досягнути синергетичного ефекту у збільшенні їх довговічності.

Мета роботи – методом математичного планування експерименту оптимізувати вміст дисперсного і волокнистого дискретного наповнювачів для захисних покриттів водного транспорту.

Результати досліджень та їх обговорення. Для оптимізації вмісту інгредієнтів при формуванні захисного покриття досліджено ударну в'язкість як одну із основних властивостей композитів з різним вмістом мікродисперсного наповнювача і дискретних волокон. Зазначимо, що як мікродисперсний наповнювач для експериментальних досліджень використано синтезовану порошкову титано-алюмінієву суміш (ПТАС) наступного складу: Ti (70 %) + Al₃Ti (15 %) + Ti₃AlC₂ (15 %). У вигляді волокнистого наповнювача використано дискретні вуглецеві волокна (ДВВ). Для стандартизації, а також для спрощення розрахунків кожен компонент (наповнювач) кодували умовними одиницями із врахуванням кроку варіювання (табл. 1).

Таблиця 1 – Рівні змінних в умовному і натуральному масштабах

Компоненти	Фактор	Середній рівень, q , мас. ч.	Крок варіювання, Δq , мас. ч.	Значення рівнів змінних (мас. ч.), що відповідають умовним одиницям		
				-1	0	+1
ПТАС	x_1	0,30	0,2	0,10	0,30	0,50
ДВВ	x_2	0,05	0,02	0,03	0,05	0,07

Відповідно до схеми планування експерименту було проведено 9 дослідів ($N = 9$), кожний з яких повторювали тричі ($p = 3$) з метою виключення системних помилок (табл. 2). Для того, щоб матриця планування була ортогональною [8], вводили коректовані значення рівня x' , які обчислювали за формулою:

$$x'_i = (x_i)^2 - \frac{\sum_{iu}^N x_{iu}^2}{N} \quad (1)$$

Розширена матриця планування повного факторного експерименту (ПФЕ) та його результати наведено у табл. 3.

Математичну модель $y = f(x_1, x_2)$ формували у вигляді рівняння регресії:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{12}x_1x_2. \quad (2)$$

Коефіцієнти регресії визначали за формулою:

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N x_i y_i}{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2}. \quad (3)$$

Таблиця 2 – Схема планування експерименту

№ досліджу (u)	x_0	x_1	x_2	$x_3 = x_1^2 - d$	$x_4 = x_2^2 - d$	$x_1 x_2$
1	1	-1	-1	0,33	0,33	+1
2	1	+1	-1	0,33	0,33	-1
3	1	-1	+1	0,33	0,33	-1
4	1	+1	+1	0,33	0,33	+1
5	1	0	0	-0,67	-0,67	0
6	1	+1	0	0,33	-0,67	0
7	1	-1	0	0,33	-0,67	0
8	1	0	+1	-0,67	0,33	0
9	1	0	-1	-0,67	0,33	0
$\sum_{u=1}^N x_{iu}^2$	9	6	6	2	2	4

Таблиця 3 – Результати дослідження ударної в'язкості КМ

№ досліджу	Вміст компонентів, q, мас.ч.		Ударна в'язкість, W, кДж/м ²
	x_1	x_2	y
1	0,10	0,03	19,4
2	0,50	0,03	20,5
3	0,10	0,07	20,4
4	0,50	0,07	19,9
5	0,30	0,05	22,8
6	0,50	0,05	23,2
7	0,10	0,05	21,9
8	0,30	0,07	20,3
9	0,30	0,03	21,0

Отримані коефіцієнти рівняння регресії наведено в табл. 4.

Таблиця 4 – Коефіцієнти рівняння регресії

b_0	b_1	b_2	b_{11}	b_{22}	b_{12}
22,96	0,32	-0,05	-0,48	-2,38	-0,40

У результаті при аналізі ударної в'язкості композитів отримали наступне рівняння регресії:

$$y = 22,96 + 0,32x_1 - 0,05x_2 - 0,48x_1^2 - 2,38x_2^2 - 0,40x_1x_2.$$

Для статистичної обробки отриманих результатів експерименту проведено перевірку відтворюваності дослідів за критерієм Кохрена:

$$G = \frac{S_{u \max}^2}{\sum_{u=1}^N S_u^2} \leq G_{(0,05; f_1; f_2)}, \quad (4)$$

де S_{iu}^2 – дисперсія, що характеризує розсіювання результатів дослідів на i -му поєднанні

рівнів факторів для $m = 3$; m – кількість паралельних дослідів; $S_{ui}^2 \max$ – найбільша з дисперсій у рядках плану.

Дисперсії адекватності визначали за формулою:

$$S_{ui}^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y}_i)^2}{m-1}, \quad (5)$$

де y_{im} – значення, отримане з кожного паралельного дослідів; \bar{y}_i – середнє значення величини y , отримане при паралельних дослідів.

Дисперсії відтворення визначали за формулами:

$$\sigma^2\{y\} = \frac{\sum_{i=1}^{N=9} \sigma^2\{y\}_i}{N(m-1)}, \quad (6)$$

де

$$\sigma^2\{y\}_i = \sum_{i=1}^{m=3} (y_i - \bar{y}_i)^2;$$

$$\sigma^2\{y_{cep}\} = \frac{a^2\{y\}}{N}, \text{ або } S_{b_0}^2 = \frac{S_0^2}{N}. \quad (7)$$

Значення дисперсій наведено у табл. 5.

Таблиця 5 – Значення дисперсій адекватності (S_{ui}^2) і дисперсій відтворення ($\sigma^2\{y\}_i$)

№ n/n	Дисперсії адекватності		Дисперсії відтворення	
	Умовне позначення	Значення	Умовне позначення	Значення
1	S_{u1}^2	0,03	$\sigma^2\{y\}_1$	0,06
2	S_{u2}^2	0,03	$\sigma^2\{y\}_2$	0,06
3	S_{u3}^2	0,01	$\sigma^2\{y\}_3$	0,02
4	S_{u4}^2	0,01	$\sigma^2\{y\}_4$	0,02
5	S_{u5}^2	0,03	$\sigma^2\{y\}_5$	0,06
6	S_{u6}^2	0,01	$\sigma^2\{y\}_6$	0,02
7	S_{u7}^2	0,03	$\sigma^2\{y\}_7$	0,06
8	S_{u8}^2	0,03	$\sigma^2\{y\}_8$	0,06
9	S_{u9}^2	0,03	$\sigma^2\{y\}_9$	0,06

При цьому:

$$\sum_{i=1}^N S_{ui}^2 = 0,21;$$

$$\sigma^2\{y\} = S_0^2 = 0,42.$$

Тоді розрахункове значення критерію Кохрена при 5 %-му рівні значущості:

$$G_{розр} = \frac{S_{u_{\max}}^2}{\sum_{i=1}^N S_{ui}^2}; \quad (8)$$

$$G_{розр} = \frac{0,03}{0,21} = 0,143.$$

Перевірка результатів експерименту за критерієм Кохрена [9, 10] для фіксованої ймовірності $\alpha = 0,05$ підтвердила відтворюваність дослідів. Дисперсія, що характеризує розсіювання результатів дослідів на i -му поєднанні рівнів факторів: $S_{u_{\max}}^2 = 0,03$. Розрахункове значення критерію Кохрена: $G_{розр} = 0,143$.

Табличне значення критерію Кохрена: $G_{табл} = 0,478$.

Тобто, виконується умова (7):

$$G_{розр} = 0,143 \leq G_{табл} = 0,478.$$

Надалі визначали значущість коефіцієнтів рівняння регресії, аналізуючи результати за планом експерименту (табл. 6).

Таблиця 6 – Експериментальні результати дослідження ударної в'язкості матеріалів

№ досліду	Ударна в'язкість КМ, W, кДж/м ²			Середнє значення, W, кДж/м ²
	1	2	3	
1	19,2	19,5	19,5	19,4
2	20,4	20,4	20,7	20,5
3	20,4	20,3	20,5	20,4
4	19,9	19,8	20	19,9
5	22,7	22,7	23	22,8
6	23,1	23,2	23,3	23,2
7	21,8	21,8	22,1	21,9
8	20,2	20,2	20,5	20,3
9	20,9	20,9	21,2	21

Надалі визначали дисперсії коефіцієнтів регресії (табл. 7) за формулою:

$$S_{b_i}^2 = \frac{S_0^2}{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2}. \quad (9)$$

Значущість коефіцієнтів регресії визначали за критерієм Стьюдента [5, 6]. При цьому визначали табличний (t_m) і розрахунковий критерій (t_p) критерії Стьюдента (табл. 7).

Залежно від ступенів вільності: $f = N(n - 1) = 9(3 - 1) = 18$ визначали табличне значення критерію Стьюдента, яке становить $t_T = 2,1$.

Визначали розрахункові значення критерію Стьюдента (t_p) і значущість коефіцієнтів: $t_{0p}, t_{1p}, t_{2p}, t_{11p}, t_{22p}, t_{12p} > t_T$.

Причому:

$$t_{ip} = \frac{|b_i|}{S_{b_i}}; \quad (10)$$

Таблиця 7 – Дисперсії коефіцієнтів регресії (S_b^2) і розрахункові значення критерію Стьюдента (t_p)

№ n/n	Дисперсії коефіцієнтів регресії		Розрахункові значення критерію Стьюдента	
	Умовне позначення	Значення	Умовне позначення	Значення
1	$S_{b_0}^2$	0,003	t_{0p}	433,14
2	$S_{b_1}^2$	0,004	t_{1p}	5,08
3	$S_{b_2}^2$	0,004	t_{2p}	0,80
4	$S_{b_{11}}^2$	0,012	t_{11p}	4,47
5	$S_{b_{22}}^2$	0,012	t_{22p}	22,07
6	$S_{b_{12}}^2$	0,006	t_{12p}	5,2

Розрахункові значення критерію Стьюдента t_{0p} , t_{1p} , t_{11p} , t_{12p} , t_{22p} є більшими від t_T , тому вважали, що коефіцієнти рівняння регресії b_0 , b_1 , b_{11} , b_{12} , b_{22} є значущими. Розрахункове значення t_{2p} є меншим від t_T , тому коефіцієнт b_2 не є значущим. У результаті відкидання незначущих коефіцієнтів отримали наступне рівняння регресії:

$$y = 22,96 + 0,32x_1 - 0,48x_1^2 - 2,38x_2^2 - 0,40x_1x_2.$$

Адекватність отриманої моделі перевіряли за критерієм Фішера [10]:

$$F_p = \frac{S_{u \max}^2}{S_y^2} \leq F_{(0,05; f_{a0}; f_y)}, \quad (11)$$

де $S_{u \max}^2 = 0,03$ – розрахункове значення дисперсії адекватності.

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S_{ui}^2}{N}, \quad (12)$$

де $S_y^2 = 0,023$ – дисперсія відтворення;

Тоді: $F_p = 1,286$.

$F_{(0,05; f_{a0}; f_u)}$ – табличне значення критерію Фішера при 5 %-му рівні значущості:

$$(f_1 = N - (k + 1) = 9 - (5 + 1) = 3, f_2 = N(n - 1) = 9(3 - 1) = 18).$$

Тоді: $F(t) = 3,16$ [9, 10].

Розрахункове значення критерію Фішера є меншим від табличного, тобто виконується умова (10). Можна вважати, що рівняння адекватно описує склад композиції.

Процес інтерпретації отриманої математичної моделі, як правило, не зводиться тільки до визначення впливу факторів. Просте порівняння за абсолютною величиною лінійних коефіцієнтів не визначає відносну ступінь впливу факторів, оскільки при цьому присутні ще й квадратичні члени та парні взаємодії. При детальному аналізі отриманої адекватної моделі потрібно враховувати і те, що для квадратичної моделі ступінь впливу фактора на зміну вихідної величини не є постійним.

Залежності, що пов'язують нормалізовані і натуральні значень змінних факторів, мають наступний вигляд:

$$x_i = \frac{q_i - q_{i0}}{\Delta q_i}, \quad (13)$$

де q_i – значення i -го фактора експерименту, q_{i0} – значення нульового рівня, Δq_i – інтервал варіювання [6].

Підставивши дані значення згідно формули (13) у рівняння регресії і провівши його перетворення, отримали наступне рівняння регресії з натуральним значенням змінних параметрів:

$$W = 4,99722 + 13,8333q_1 - 12,0833q_1^2 - 100,0q_1q_2 - 5958,33q_2^2.$$

Наведене рівняння в натуральних значеннях дозволяє лише передбачити значення вихідної величини для будь-якої точки в середині області варіювання факторів. Однак, з його допомогою можна побудувати графіки залежності вихідної величини (ударна в'язкість) від будь-якого фактору (чи двох факторів). Геометричну інтерпретацію поверхні відгуку наведено на рис. 1–3.

На основі експериментальних досліджень встановлено, що обидва фактори є значущими. Слід зазначити, що вплив вмісту порошкової титано-алюмінієвої суміші на показники ударної в'язкості є не таким суттєвим порівняно з дискретними волокнами (згідно з картою Парето). Аналізуючи розраховану поверхню відгуку визначено, що оптимальні показники ударної в'язкості має розроблений епоксидний композит із частками порошкової титано-алюмінієвої суміші та дискретних вуглецевих волокон за наступного вмісту: ПТАС – 0,3...0,5 мас.ч., ДВВ – 0,05 мас.ч. ($W = 22,8...23,2$ кДж/м²).

Карта Парето

Головні ефекти W

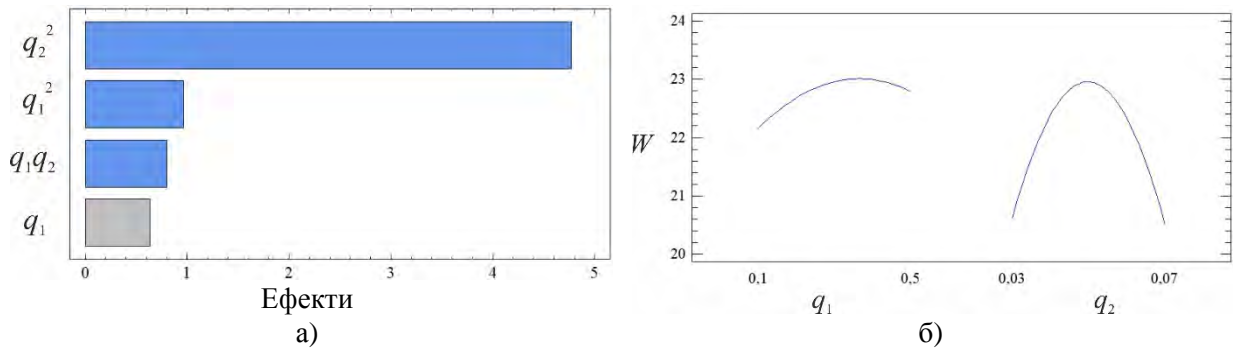


Рисунок 1 – Карта Паретто (а) і головні ефекти у (б)

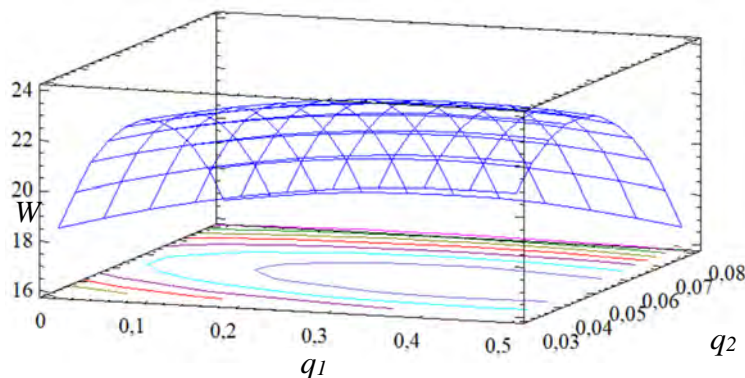


Рисунок 2 – Розрахункова поверхня відгуку $W = f(q_1, q_2)$

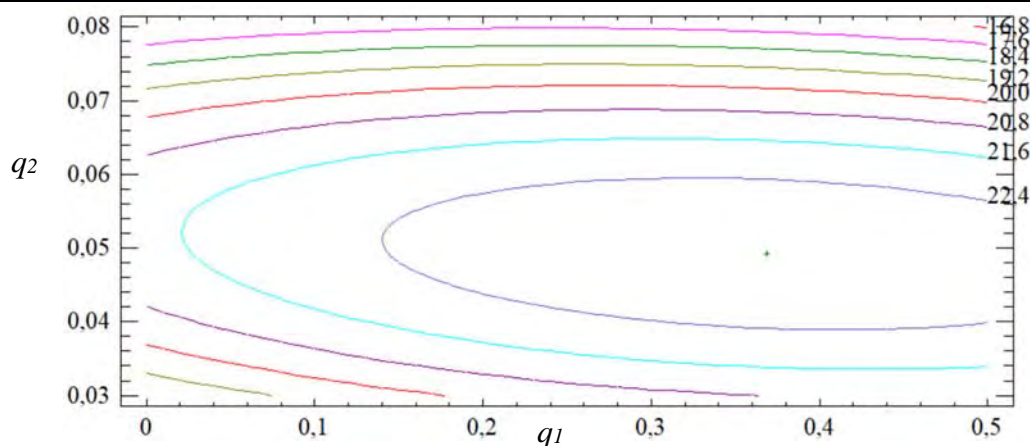


Рисунок 3 – Контури розрахункової поверхні відгуку

Отримані результати свідчать, що обидва фактори рівняння регресії є значущими. Слід зазначити, що на вихідні параметри композиту суттєво впливає квадратична залежність другого фактору (вміст дискретних вуглецевих волокон). У процесі аналізу встановлено, що показники ударної в'язкості набувають максимальних значень при оптимальному вмісті компонентів. Зокрема, з рис. 2 помітно, що додаткове підвищення показників ударної в'язкості є можливим при збільшенні вмісту наповнювача ПТАС.

Висновки. Методом математичного планування експерименту встановлено оптимальний вміст дисперсного і волокнистого дискретного наповнювачів: порошкова титано-алюмінієва суміш – 0,3...0,5 мас.ч., дискретні вуглецеві волокна – 0,05 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20. Введення до епоксидного зв'язувача таких інгредієнтів дозволяє підвищити показники ударної в'язкості епоксидних композитів до $W = 22,8...23,2$ кДж/м². Проаналізовано, що при збільшенні вмісту порошкової титано-алюмінієвої суміші є можливим додатково підвищувати показники ударної в'язкості матеріалів. Отримані результати дозволяють створити матеріали з поліпшеними у комплексі показниками фізико-механічних властивостей. Розроблені матеріали доцільно використовувати у вигляді захисних покриттів для підвищення ресурсу роботи і ремонту деталей транспортної техніки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Hussain Manwar, Nakahira Atsushi, Niihara Koichi. Mechanical property improvement of carbon fiber reinforced epoxy composites by Al₂O₃ filler dispersion. *Materials Letters*. 1996. V. 26, Issue 3. P. 185–191.
2. Sandler J., Shaffer M.S.P., Prasse T., Bauhofer W., Schulte K., Windle A.H. Development of a dispersion process for carbon nanotubes in an epoxy matrix and the resulting electrical properties. *Polymer*. 1999. V. 40, Issue 21. P. 5967–5971.
3. Buketov A., Maruschak P., Sapronov O., Zinchenko D., Yatsyuk V., Panin S. Enhancing performance characteristics of equipment of sea and river transport by using epoxy composites. *Transport*. 2016. Vol. 31(3). P. 333–342.
4. Лысенков Э. А., Леонова Н. Г., Жильцова С. В. Влияние кремнийсодержащей фазы на иерархичность структуры эпоксидно-полисилоксановых нанокомпозитов. *Теоретическая и экспериментальная химия*. 2019. Т. 55. № 4. С. 226–233.
5. Lysenkov E. A. Simulation of thermal conductivity of polymer nanocomposites, using models based on thermal-electrical analogy. *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*. 2019. Vol. 17, № 4. P. 761–772.
6. Zhylytsova, S.V., Leonova, N.G. & Lysenkov, E.A. Effect of Epoxy Oligomer on the Hierarchical Structure of Silica Nanoparticles Formed in a Polymer Matrix. *Theoretical and Experimental Chemistry*. 2020. V. 56. P. 275–282.

7. Buketov A., Yakushchenko S., Menou Abdellah, Bezbakh O., Vrublevskiy R., Kalba Y., Cherniavska T., Zhytnyk D., Danylyuk O. Optimization of ingredients upon development of the protective polymeric composite coatings for the river and sea transport. *Mechanical Engineering in Transport*. 2021. № 2. B89–B96.
8. Бондарь А. Г., Статюха Г. А. *Планирование эксперимента в химической технологии (основное положение, примеры и задачи)* : учебн. [для студ. высш.учеб.завед.]. Киев : Вища школа, 1976. 184 с.
9. Грушко И. М., Попов В. В. и др. *Основы научных исследований*: учебник для технических вузов / под ред. В. И. Крутова, В. В. Попова. Москва : Высшая школа, 1989. 400 с.
10. *Математические методы планирования эксперимента* / под ред. В. В. Пененко Новосибирск : Наука, 1981. 250 с.

REFERENCES

1. Hussain Manwar, Nakahira Atsushi, Niihara Koichi (1996). Mechanical property improvement of carbon fiber reinforced epoxy composites by Al₂O₃ filler dispersion. *Materials Letters*. V. 26, Issue 3. P. 185–191.
2. Sandler J., Shaffer M.S.P., Prasse T., Bauhofer W., Schulte K., Windle A.H. (1999). Development of a dispersion process for carbon nanotubes in an epoxy matrix and the resulting electrical properties. *Polymer*. V. 40, Issue 21. P. 5967–5971.
3. Buketov A., Maruschak P., Saponov O., Zinchenko D., Yatsyuk V., Panin S. (2016). Enhancing performance characteristics of equipment of sea and river transport by using epoxy composites. *Transport*. Vol. 31 (3). P. 333–342.
4. Lihsenkov Eh. A., Leonova N. G., Zhiljцова S. V. (2019). Vliyanie kremnijsoderzhathej fazih na ierarkhichnostj strukturih ehpoksidno-polisiloksanovihkh nanokompozitov. *Teoreticheskaya i ehksperimentaljnaya khimiya*. Vol. 55. № 4. P. 226–233.
5. Lysenkov E. A. (2019). Simulation of thermal conductivity of polymer nanocomposites, using models based on thermal-electrical analogy. *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*. Vol. 17, № 4. P. 761–772.
6. Zhylytsova, S.V., Leonova, N.G. & Lysenkov, E.A. (2020). Effect of Epoxy Oligomer on the Hierarchical Structure of Silica Nanoparticles Formed in a Polymer Matrix. *Theoretical and Experimental Chemistry*. V. 56. P. 275–282.
7. Buketov A., Yakushchenko S., Menou Abdellah, Bezbakh O., Vrublevskiy R., Kalba Y., Cherniavska T., Zhytnyk D., Danylyuk O. (2021). Optimization of ingredients upon development of the protective polymeric composite coatings for the river and sea transport. *Mechanical Engineering in Transport*. № 2. B89–B96.
8. Bondarj A. G., Statyukha G. A. (1976). *Planirovanie ehksperimenta v khimicheskoyj tekhnologii (osnovne polozhenie, primerih i zadachi)* : uchebn. [dlya stud. vihssh.ucheb.zaved.]. Kiev : Vitha shkola.
9. Grushko I. M., Popov V. V. i dr. (1989). *Osnovih nauchnihkh issledovaniyj: uchebnik dlya tekhnicheskikh vuzov / pod red. V.I.Krutova, V.V. Popova*. Moskva : Vihsshaya shkola.
10. *Matematicheskie metodih planirovaniya ehksperimenta* (1981). / pod red. Penenko V.V. Novosibirsk : Nauka.

Букетов А. В., Гусев В. Н., Кулинич А. Г., Якущенко С. В., Житник Д. В. ОПТИМИЗАЦИЯ СОДЕРЖАНИЯ ИНГРЕДИЕНТОВ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА РАБОТЫ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Обоснована необхідність застосування полімерних композитів в виробництві і ремонті деталей і об'єктів в різних галузях промисловості, в тому числі і в водному транспорті. Це обумовлено значительною інтенсивністю об'ємів перевезення вантажів, збільшенням умов навантаження транспортних засобів, а також їх роботою в умовах впливу агресивних серед. При цьому висувають нові вимоги до покращення показників ресурсозбереження деталей транспортних засобів і скорочення строків ремонтних робіт.

Доказано, что для улучшения эксплуатационных характеристик эпоксидных композитов в связующее необходимо вводить добавки различной физической и химической природы при оптимальном содержании. В работе оптимизировано содержание дисперсных частиц синтезированной порошковой титано-алюминиевой смеси и дискретных углеродных волокон, которые вводили в связующее для повышения показателей механических свойств эпоксидных материалов.

Цель работы – методом математического планирования эксперимента оптимизировать содержание дисперсного и волокнистого дискретного наполнителей для защитных покрытий водного транспорта.

Методом математического планирования эксперимента установлено оптимальное содержание дисперсного и волокнистого дискретного наполнителей: порошковая титано-алюминиевая смесь – 0,3...0,5 масс.ч., дискретные углеродные волокна – 0,05 масс.ч. на 100 масс.ч. эпоксидного олигомера ЭД-20. Введение в эпоксидное связующее таких ингредиентов позволяет повысить показатели ударной вязкости эпоксидных композитов до $W = 22,8...23,2$ кДж/м². Проанализировано, что при увеличении содержания порошковой титано-алюминиевой смеси возможно дополнительно повышать показатели ударной вязкости материалов. Полученные результаты позволяют создать материалы с улучшенными в комплексе показателям физико-механических свойств. Разработанные материалы целесообразно использовать в виде защитных покрытий для повышения ресурса работы и ремонта деталей транспортной техники.

Ключевые слова: оптимизация, композит, эпоксидная матрица, математическое планирование эксперимента, уравнение регрессии.

Buketov A. V., Gusev V. N., Kulinich A. G., Yakushchenko S. V., Zhitnik D. V. OPTIMIZATION IN PLACE OF INGREDIENTS IN THE FORMULATION OF NEW APPLICATIONS FOR INCREASING THE RESOURCE OF ROBOTS AND TRANSPORT VEHICLES

The necessity of using polymer composites in the production and repair of parts and objects in various industries, including water transport, has been substantiated. This is due to the significant intensity of the volume of cargo transportation, an increase in the load conditions of vehicles, as well as their operation under the influence of aggressive media. At the same time, new requirements are being put forward for improving the indicators of resource saving of vehicle parts and reducing the time of repair work.

It has been proven that to improve the performance of epoxy composites, it is necessary to add additives of various physical and chemical nature to the binder at an optimal content. The work optimizes the content of dispersed particles of the synthesized powder titanium-aluminum mixture and discrete carbon fibers, which were introduced into the binder to improve the mechanical properties of epoxy materials.

The aim of the work is to optimize the content of dispersed and fibrous discrete fillers for protective coatings of water transport using the method of mathematical planning of the experiment.

Using the method of mathematical planning of the experiment, the optimal content of dispersed and fibrous discrete fillers has been established: powder titanium-aluminum mixture – 0.3...0.5 mass parts, discrete carbon fibers – 0.05 mass parts per 100 mass parts epoxy oligomer ED-20. The introduction of such ingredients into the epoxy binder makes it possible to increase the impact strength of epoxy composites up to $W = 22.8...23.2$ kJ/m². It is analyzed that with an increase in the content of the powder titanium-aluminum mixture, it is possible to further increase the impact strength of materials. The results obtained make it possible to create materials with improved physical and mechanical properties in the complex. It is advisable to use the developed materials in the form of protective coatings to increase the service life and repair parts of transport equipment.

Keywords: optimization, composite, epoxy matrix, mathematical planning of the experiment, regression equation.

© Букетов А. В., Гусев В. М., Кулініч А. Г., Якущенко С. В., Житник Д. В.

Статтю прийнято
до редакції 20.11.20

ОПТИМІЗАЦІЯ ВИТРАТ ЦИЛІНДРОВОГО МАСЛА ЗАВДЯКИ ОПТИМІЗАЦІЇ АСС-ФАКТОРА

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;

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

У статті описано метод оптимізації витрати циліндрового масла для дизеля, що використовує паливо з високим вмістом сірки, досягається це знаходженням оптимальної величини АСС-фактору. Циліндрове масло змішується, щоб досягти необхідного рівня миття та диспергування, щоб зберегти поршневі кільця та втулку, а також необхідне базове число (BN) для нейтралізації кислот, утворених під час згоряння. Циліндрове масло не тільки слугує для змащення рухомих частин, але також призначене для контролю ступеня корозії на поверхні гільзи. Однак, щоб забезпечити необхідний ефект змащення, збільшення утворення кислоти вимагатиме більш високого рівня BN, ніж указано за мінімального режиму подачі. Це компенсується шляхом обчислення швидкості подачі на основі коефіцієнта АСС. Його значення визначається для кожного двигуна окремо й залежить від його технічного стану і особливостей системи циліндрового масла. Значення АСС-фактора є постійним і витрата циліндрового масла Feed Rate при переході на різні палива залежить тільки від вмісту в ньому сірки.

Дослідження показало, що оптимальна витрата циліндрового масла для дизеля, що використовує паливо з високим вмістом сірки, досягається знаходженням оптимальної величини АСС-фактору. Його значення визначається для кожного двигуна окремо і залежить від його технічного стану та особливостей системи циліндрового масла. Значення АСС-фактора є постійним і витрата циліндрового масла Feed Rate при переході на різні палива залежить тільки від вмісту в ньому сірки.
Ключові слова: АСС-фактор, оптимізація, витрата циліндрового масла.

DOI: 10.33815/2313-4763.2020.2.23.069-079

Вступ. Циліндрове масло є важливим для двотактного двигуна. Сучасні циліндрові масла виробляються зі складною хімією, тому індивідуальний обсяг подачі повинен бути оцінений для кожної марки масла, класу в'язкості та рівня BN.

Циліндрове масло змішується, щоб досягти необхідного рівня миття та диспергування, щоб зберегти поршневі кільця та втулку, а також необхідне базове число (BN) для нейтралізації кислот, утворених під час згоряння. Циліндрове масло не тільки слугує для змащення рухомих частин, але також призначене для контролю ступеня корозії на поверхні гільзи.

Це ілюструється у посібнику швидкості подачі, яка встановлює мінімальну швидкість подачі до рівня, необхідного для підтримки рухомих частин у межах безпечного краю. Однак, щоб забезпечити необхідний ефект змащення, збільшення утворення кислоти вимагатиме більш високого рівня BN, ніж указано за мінімального режиму подачі. Це компенсується шляхом обчислення швидкості подачі на основі коефіцієнта АСС.

Мета статті. Розробити комплекс заходів для підвищення техніко-економічних показників суднового двигуна завдяки оптимізації витрат циліндрового масла.

Основна частина. Найкращий спосіб установити оптимальний коефіцієнт АСС – це вимірювання зносу двигуна. Якщо рівень зношування поршнів та поршневих кілець занадто високий через корозію, коефіцієнт АСС повинен бути збільшений, щоб зменшити знос.

Аналіз зливного масла також є потужним інструментом для оцінювання стану зносу двигуна. Зразки зливного масла, взяті під час активної роботи АСС, покажуть, чи можна оптимізувати швидкість подачі масла, зберігаючи BN між 10...25 мг КОН / кг, а вміст заліза (Fe) нижче 200...300 мг / кг у зливному маслі (для навантажень більше 50 %) рис. 1.

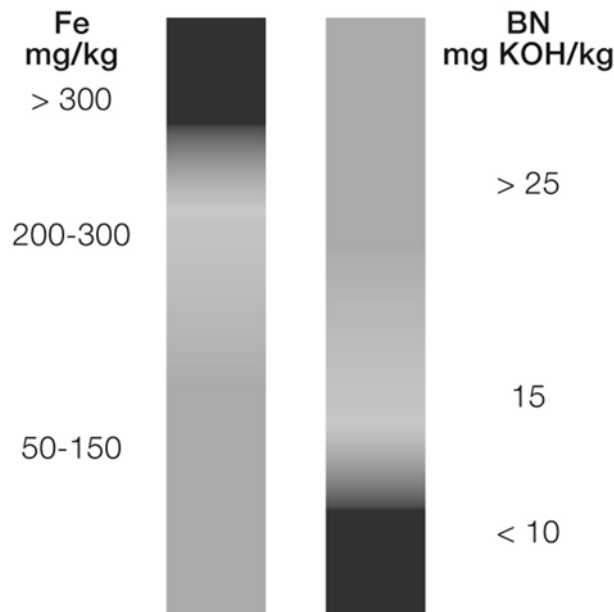


Рисунок 1 – Вимірювання результатів проб циліндрового масла

Використовуване масло, взяте з двигуна з під циліндрового простору, може використовуватися для оцінювання стану циліндрів. Бортові прибори існують, але важливо отримати дійсний результат тесту, який показує загальний вміст заліза (Fe). Лабораторне випробування за ASTM D5185-09 є єдиним точним методом вимірювання.

Вимірювання XRF також виявилось надійним способом вимірювання вмісту Fe, проте загальні стандарти для вимірювання та калібрування ще не доступні. Циліндрове масло може бути деградованим до певного рівня, від якого рівень корозії починає збільшуватися. Рівень виснаження відрізняється серед нафтових марок, а також серед двигунів, тому рекомендується індивідуальне оцінювання кожного двигуна.

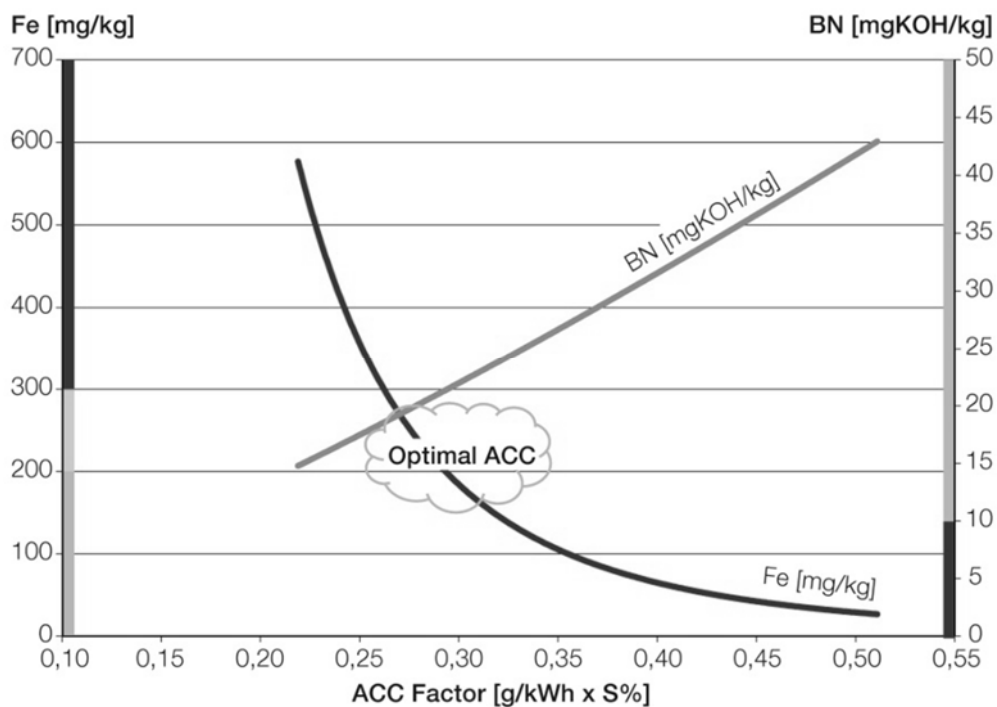


Рисунок 2 – Графік оцінювання Sweep-тесту

Однією з можливостей є проведення Sweep-тесту під назвою «розгортання швидкості» (рис. 2). Це скоротить значний час на ознайомлення з АСС. Тест на розгортання базується на швидкому шестиденному випробуванні при стійкому навантаженні і, бажано, на паливі з високим вмістом сірки 2,5...3,5%. Швидкість подачі регулюється для встановлення значень, тобто 1,4; 1,2; 1,0; 0,8 та 0,6 г/кВт·год. Кожна швидкість подачі повинна застосовуватися протягом 24 годин, перш ніж приймати зразок та переходити на наступну швидкість подачі.

Різні постачальники нафти пропонують циліндрові масла з широким діапазоном BN-рівнів. У двигунах MAN B & W традиційно використовується масло з рівнем 70 BN, однак, оскільки нові нафтопродукти були введені в експлуатацію, рівень BN змінився. Переходячи на інший рівень BN, рекомендовано почати з масштабування коефіцієнта АСС від 70 до нового рівня BN, помноживши фактор АСС на частку 70/BN масла.

Приклад:

Переходимо на масло з BN 45

$АСС (BN 70) = 0,26$

Отримуємо:

$АСС (BN 45) = 0,26 \times 70/45 = 0,40$

При переході на новий бренд або тип масла, фактор АСС доведеться переоцінити, як описано вище, починаючи з фактора АСС у верхньому діапазоні. Після цього поступове зниження може бути здійснене на основі фактичних спостережень умов або випробувань на розмивання.

Під час роботи на залишковому паливі з низьким вмістом сірки (HFO) швидкість подачі буде встановлена на мінімальну швидкість подачі. Високі BN циліндрового масла призведуть до збільшення накопичення відкладень на поршнях.

Тому MAN B & W рекомендує переключитися на циліндрове масло з низьким рівнем BN одночасно з переходом на важке паливо з низьким вмістом сірки. Безперервний пробіг на циліндрових маслах з високим BN можна лише використовувати в особливих випадках, не більше 1...2 тижнів.

Також при переході на дистилатне паливо (MGO/MDO) MAN B & W рекомендує переключитися на циліндрове масло з низьким вмістом BN одночасно із зміною палива. Не рекомендується використовувати циліндрові масла з високим BN при роботі на дистилатному паливі.

Робота з частковим навантаженням (режим малого ходу). При роботі двигуна при частковому навантаженні холодна корозійна поведінка може відхилитися від роботи при нормальному навантаженні. Коли судно йде у режимі малого ходу, двигун працює під малим навантаженням, а поверхня вкладиша стає охолоджувачем, отже, підвищується ризик корозії. Відновлення відновлювального тепла та різні варіанти оптимізації часткового навантаження, наприклад, турбонагнітач із змінною турбіною (VTA) і байпасом вихлопних газів (EGB) можуть вимагати повторного оцінювання коефіцієнта АСС.

Після періоду розриву коефіцієнт АСС двигуна повинен бути оцінений протягом періоду 600 годин. Щоб мати змогу оцінити знос двигуна, кроки повинні бути виконані з урахуванням вмісту у паливі сірки, яке є достатньо високим, щоб забезпечити швидкість подачі масла в циліндри в активному діапазоні АСС. Це означає, що швидкість подачі повинна перевищувати мінімум 0,60 г/кВт·год. Перед тим, як перейти на наступний крок, стан циліндра та його зношування повинні бути оцінені через перевірку порту. У деяких випадках цей період вибору значно продовжується. Проте цей період можна суттєво скоротити за допомогою аналізу стоку, коли лабораторні результати покажуть залишковий вміст BN та Fe (залізо). Якщо зразки, взяті під час активної подачі АСС, багаторазово демонструють високий рівень BN та прийнятний (Fe) рівень, фактор АСС може бути знижений. Залежність між рівнем BN та рівнем (Fe) у відпрацьованому маслі зображена на рис. 3.

Зміна швидкості подачі також може бути виконана для швидкого виявлення правильного діапазону АСС для заданої конфігурації та навантаження двигуна. Робота з двотактними двигунами MAN B&W потребує додаткової уваги та змащення протягом перших годин роботи. Перші 500 годин роботи є найбільш вимогливими. Це період, коли залипають кільця, що також називається як період обкатування. Метою періоду обкатування є зняття частинок зносу та полегшення входження поверхні втулки та кільця. Після закінчення періоду обкатування слід перейти до періоду вибору, в якому команда повинна оцінити стан зносу двигуна та стан циліндра, щоб вибрати правильний коефіцієнт АСС для застосування двигуна.

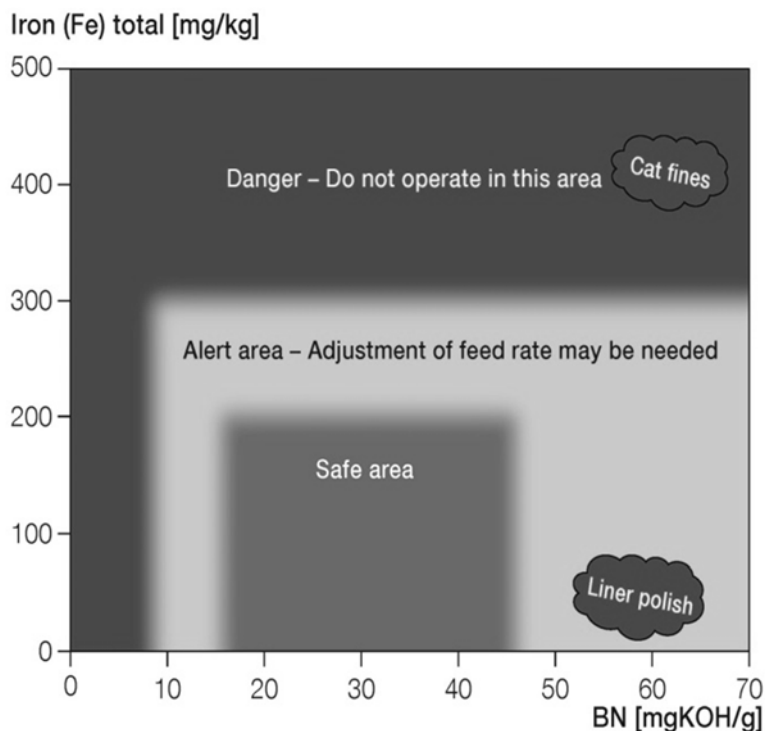


Рисунок 3 – Залежність між рівнем BN та рівнем (Fe) у відпрацьованому маслі

Під час обкатування покриття на поршневих кільцях буде поступово зношуватися, а форма нарізки хвилі на поверхню вкладиша циліндра буде згладжена. Під час цього процесу необхідно змащувати циліндри додатково маслом, щоб змити частинки зносу та забезпечити задовільну масляну плівку між відносно нерівними ковзаючими поверхнями.

Під час обкатування MAN B&W рекомендує перевіряти поршневі кільця та циліндрові втулки через перевірку повітряного порту за кожні 100 годин. Не потрібно переходити до наступного етапу змащення, якщо перевірка повітряного порту виявляє порушення. Коли ступені розбивки досягають 1,20 г/кВт·год, також слід урахувувати швидкість подавання масла залежно від вмісту сірки в паливі. Встановлена швидкість подавання повинна бути найбільшою з двох.

Таблиця 1 – Залежність подачі масла від годин

Години роботи	Подача масла до циліндрів г/(кВт·ч)
0-5	1,7
5-100	1,5
100-200	1,3
200-300	1,1
300-400	0,9
400-500	0,7

Процедура *Feed rate sweep-тесту* для циліндрового масла у двотактних двигунах *MAN B & W*. Найшвидший спосіб оцінити корозійну поведінку двигуна – провести sweep-тест, так звану розгортку швидкості подачі. Він також може використовуватися в періоді ознайомлення з АСС, щоб знайти відповідну швидкість подавання масла для Вашого конкретного двигуна та використовуюваного циліндрового масла. Під час sweep-тесту судно повинно працювати на паливі, вміст сірки в якому перевищує 2,5 %. Тестування Sweep-test триває 6 днів і повинно виконуватися протягом довшого рейсу, якщо навантаження двигуна залишається постійним і вище 25% навантаження за цей період. Швидкість подачі циліндрового масла встановлюється на фіксованих ступенях, а зразки масла відводять через 24 години, перш ніж опустити на наступний крок (рис. 4).

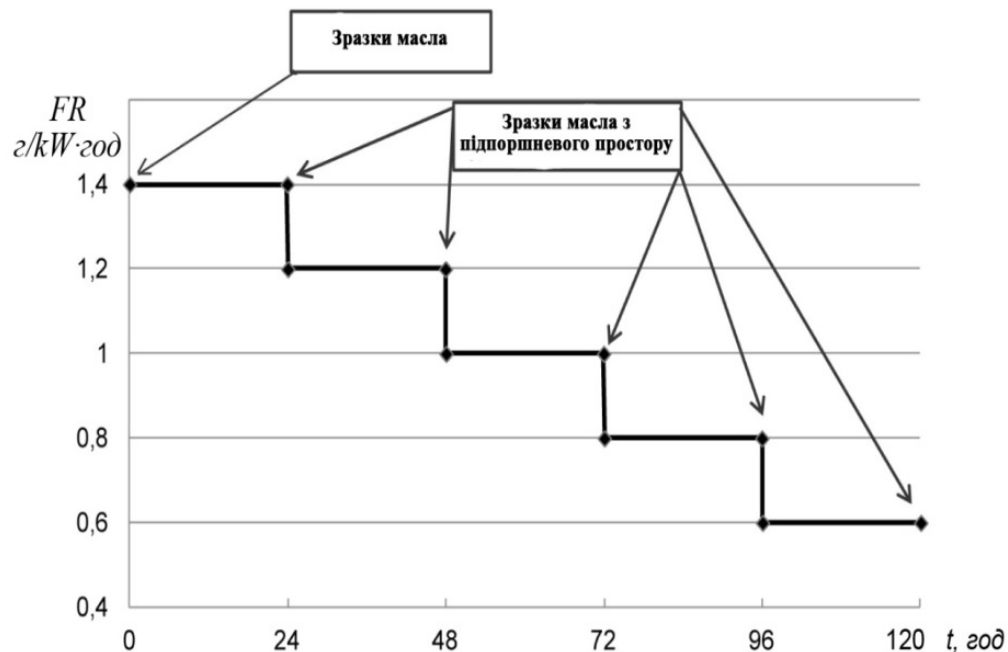


Рисунок 4 – Схема оптимізації швидкості подачі масла – Feed rate sweep test

Перед початком випробування необхідно провести інспекцію порту та взяти зразки палива, системного масла та свіжого (невикористаного) циліндрового масла. Після завершення випробування всі зразки повинні надсилатися на узбережжя в сертифіковану лабораторію. Потрібно проаналізувати вміст заліза (Fe) та значення BN. Концентрацію Fe слід аналізувати, використовуючи ASTM D5185-09, і BN слід аналізувати за методом ISO 3771: 2011 (E). Концентрація Fe буде вимірюванням стану корозії та зносу. Рівень BN у зливному маслі – це оцінювання продуктивності масла і необхідності нейтралізації впливу сірки в паливі на знос. Коли результати зразків зливного масла повернуться, можна побачити, чи є кореляція між коефіцієнтом АСС і Fe та BN.

Процедура тестування:

День 1

(Принаймні 24 години після виходу)

Переконайтеся, що правильне циліндрове масло бункерується. Відрегулюйте швидкість подачі циліндрового масла до 1,4 г/кВт·год. Запишіть наступну інформацію в Sweep-test.

Протокол:

- а. Назва судна та тип двигуна.
- б. Дата і час початку тесту.
- с. Назва та марка циліндрових масел, BN та SAE в'язкості.
- д. Навантаження двигуна.

День 2

Пройшовши 24 години на швидкості подавання масла в циліндрі 1,4 г/кВт-год, зразки зливного масла повинні бути взяті з усіх циліндрів.

Важливо: перед тим, як узяти зразок, обов'язково потрібно злити масло зі зливного клапана у відро. Використовується лише чисті пляшки та переконуються, що не відбувається змішування зливного масла з різних циліндрів. Позначте пляшки з наступною інформацією:

- а. Циліндр №.
- б. Дата і час.
- с. Назва та номер VN циліндрового масла.
- д. Швидкість подачі циліндрового масла.
- е. Навантаження двигуна.

Також запишіть інформацію в тестовому протоколі. Після цього швидкість подачі масла циліндра повинна бути відкоригована до 1,2 г/кВт-год.

День 3

Після 24 годин роботи циліндрового розчину масла 1,2 г/кВт-год зразки зливного масла повинні бути взяті з усіх циліндрів. Зразок-процедура аналогічна до 2-го дня. Після цього швидкість подачі масла циліндра повинна бути відкоригована до 1,0 г/кВт-год.

День 4

Після 24 годин роботи циліндрового масла з подачею 1,0 г/кВт-год зразки зливного масла повинні бути взяті з усіх циліндрів. Зразок-процедура аналогічна дню 2. Після цього швидкість подачі масла циліндра повинна бути відкоригована до 0,8 г/кВт-год.

День 5

Пройшовши 24 години на швидкості подачі масла в циліндрі 0,8 г/кВт-год, зразки зливного масла повинні бути взяті з усіх циліндрів. Процедура зразка аналогічна до 2-го дня. Після цього швидкість подачі масла циліндра повинна бути відкоригована до 0,6 г/кВт-год.

День 6

Після проходження 24 год на швидкості подачі масла в циліндрі 0,6 г/кВт-год зразки зливного масла повинні бути взяті з усіх циліндрів. Процедура зразка аналогічна до 2-го дня. Після цього швидкість подачі масла циліндра повинна бути скоригована до нормального коефіцієнта АСС.

Оцінка тесту Sweep-тест. Мета тесту полягає в тому, щоб показати кореляцію між корозійним впливом двигуна та здатністю циліндрового масла протидіяти цьому. Коли результати аналізу зразків повертаються з лабораторії, дані повинні бути оцінені.

Тест розкладки, виконаний нижче точки розриву навантаження, безпосередньо не може використовуватися для розрахунку значення АСС. У точці розриву алгоритм регулювання дозування циліндрового масла змінюється залежно від навантаження. Це означає, що питома доза [г/кВт] буде зростати з цієї точки та нижче. Якщо для оцінювання АСС використовуються результати тестування, швидкість подавання масла повинна бути відкалібрована до питомих значень точок. Однак розмах буде давати оцінку необхідності циліндрового масла в робочій точці, де вона була зроблена.

Обчислення фактичного коефіцієнта АСС для випробування на розгортку виконується на навантаженні вище точки розриву навантаження на частину масла. Під час тесту швидкість подавання масла встановлюється на фіксованих етапах. Коефіцієнт АСС для кожного етапу може бути розрахований шляхом ділення ступеня швидкості подачі на % сірки в паливі.

Розраховані значення АСС використовуються для кореляції значень Fe та VN у зразках. У таблиці заносять розрахункові АСС та значення Fe і VN. Потім креслять два графіки, де АСС відображає горизонтальну вісь (вісь x), а значення Fe – вертикальна вісь на графіку 1 та VN на графіку. Потім поєднують графіки Fe і VN в один. Fe лівою вертикальною віссю, а VN правою (рис. 5).

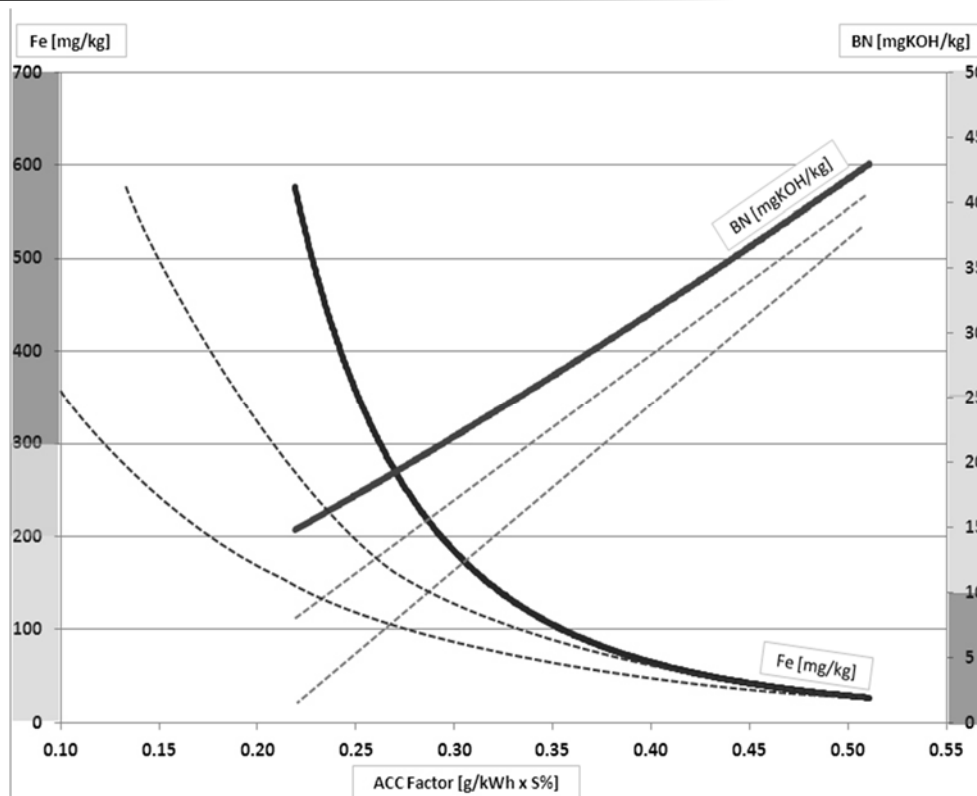


Рисунок 5 – Результати оцінювання Sweep-тесту

На рис. 5 пояснюється, як був оцінений тест розгортання. У нормальному випадку Fe концентрація повільно піднімається до точки, де вона буде швидко зростати. Прийнятний АСС-коефіцієнт знайдено безпосередньо перед швидким збільшенням Fe або іншим способом, перш ніж концентрація Fe досягне червоної області (рис.5). Вибір коефіцієнта АСС у них відповідає прийнятному рівню Fe означає, що корозія контролюється. Після того, як коефіцієнт АСС був визначений відповідно до Fe, відповідне значення BN можна знайти. Це показує можливий рівень BN, що може безпосередньо вплинути на продуктивність масла.

На рис. 5 коефіцієнт АСС відображається на осі X. Концентрація Fe (мг/кг) зображується червоними лініями, і результат зчитують на лівій осі Y. Вісь розділена на три частини. Зелена смужка показує безпечну експлуатаційну умову, 0...200 Fe (мг/кг), а оранжева смужка – це «пилна область», 200...300 Fe (мг/кг), яка означає, що втулка циліндра та циліндрове масло почали досягати своїх меж. Коли концентрація Fe досягає вище 300 мг/кг (червона смужка), знос або корозія почали значно збільшуватися, а швидкість подачі масла повинна бути збільшена. Інша концентрація BN (мгKOH/кг) зображена синіми лініями, результати зчитують на правильній осі Y. Вісь розділена на дві частини. Червона смужка (0...10 BN) означає, що здатність до нейтралізації у циліндрового масла почала знижуватися і збільшується ризик корозії. Зелена смужка (10...50 BN) демонструє безпечну роботу.

Широка блакитна та червона лінії – це значення BN і Fe. Для того щоб знайти правильний коефіцієнт АСС та можливий рівень зниження BN циліндрового масла, процедура виглядає наступним чином: слідуєте за широкою червоною лінією та знайдіть концентрацію Fe для безпечної експлуатації. На рис.5 це 200 мг/кг, тому що після цього нахил широкої червоної лінії швидко зростає. Відповідний коефіцієнт АСС знаходиться на осі X і в цьому випадку 0,30 г/кВт·год × S%. Решта значення BN, що відповідає цій безпечній операції, виявляється за допомогою кривої BN (на цьому графіку – синя широка лінія) і прочитати результат правої осі X. У цьому випадку коефіцієнт АСС 0,3 відповідає 22 BN. Штрихові лінії – це приклади того, як можуть виглядати інші випробування розгортки з іншими циліндровими маслами.

Для визначення оптимального АСС-фактора застосуємо метод налаштування швидкості подавання масла – Feed rate sweep-тест, запропонований фірмою MAN B&W. Виконувалися дослідження на судовому дизелі MAN 6S70MC нафтового танкера «EURODIGNITY» дедвейтом 159342 тони.

Дослідження виконувалися тільки на сталих режимах роботи дизеля. Сталість навантаження на дизель визначалася незмінними частотою обертання колінчастого вала і цикловою подачею палива.

Основні характеристики дизеля:

- потужність – 15660 кВт;
- частота обертання – 91 хв⁻¹;
- кількість циліндрів – 6;
- діаметр циліндра – 700 мм.

Під час проведення експериментальних досліджень дизель працював на одному і тому ж виді палива марки RMK 700 із наступними характеристиками:

- щільність при 15 °С – 990 кг/м³;
- в'язкість при 50 °С – 700 сСт;
- температура спалаху (min) – 60 °С;
- вміст сірки – 2,8%.

Змащування циліндрів дизеля забезпечувалося маслом Mobilgard570 з наступними показниками:

- щільність при 15 °С – 820 кг/м³;
- температура спалаху – 256 °С;
- в'язкість при 40 °С – 229 сСт;
- в'язкість при 100 °С – 21 сСт;
- лужне число (total base number – TBN) – 70 мгКОН/г.

Даний тест проводився протягом 6-и днів. За цей період значення питомої подачі циліндрового масла змінювалося від 1,4 г/кВт год до 0,6 г/кВт год. Кожного дня проводився забір проб масла при поточних налаштуваннях. З кожної проби визначалося лужне число (BN) та кількість металевих частинок (PQI) в маслі, взятому з підпоршневих просторів дизеля. Усі отримані дані записувалися в таблиці 3.2, 3.3.

Розрахуємо АСС-фактор для кожного етапу згідно з формулою:

$$ACC \text{ (розрахунковий)} = FR / S.$$

Результати розрахунку перенесемо в табл. 2.

Таблиця 2 – Результати кількості металевих частинок Fe (PQI) в маслі, взятому з підпоршневих просторів дизеля

Циліндр	1	2	3	4	5	6	Середнє значення
FR г/(кВт·год)	Кількість металевих частинок (PQI) мг/кг						
1,4	86	87	88	92	91	90	89
1	94	88	78	83	91	80	87
0,8	99	102	90	91	94	78	92
0,6	280	249	190	235	210	195	226
0,4	–	–	–	–	–	–	–

Таблиця 3 – Результати лужного числа (BN) у маслі, взятому з підпоршневих просторів дизеля

Циліндр	1	2	3	4	5	6	Середнє значення
FR г/(кВт·год)	Лужне число (BN) мгКОН/кг						
1,4	40	40	41	40	40	41	40
1	39	41	42	37	40	38	39
0,8	31	30	27	26	28	29	28
0,6	17	15	11	10	9	13	12
0,4	–	–	–	–	–	–	–

Таблиця 4 – Визначення розрахункового АСС-фактора

FR, г/(кВт·год)	Сірки в паливі S, %	АСС (розрахунковий)
1,4	2,8	0,5
1,2	2,8	0,43
1,0	2,8	0,36
0,8	2,8	0,28
0,6	2,8	0,21

Для визначення оптимального АСС-фактора потрібно побудувати графік на підставі даних таблиць 2...4, де АСС-фактор розташовується на горизонтальній осі Х, а значення PQI на лівій вертикальній осі Y та BN на правій вертикальній осі (рис. 6)

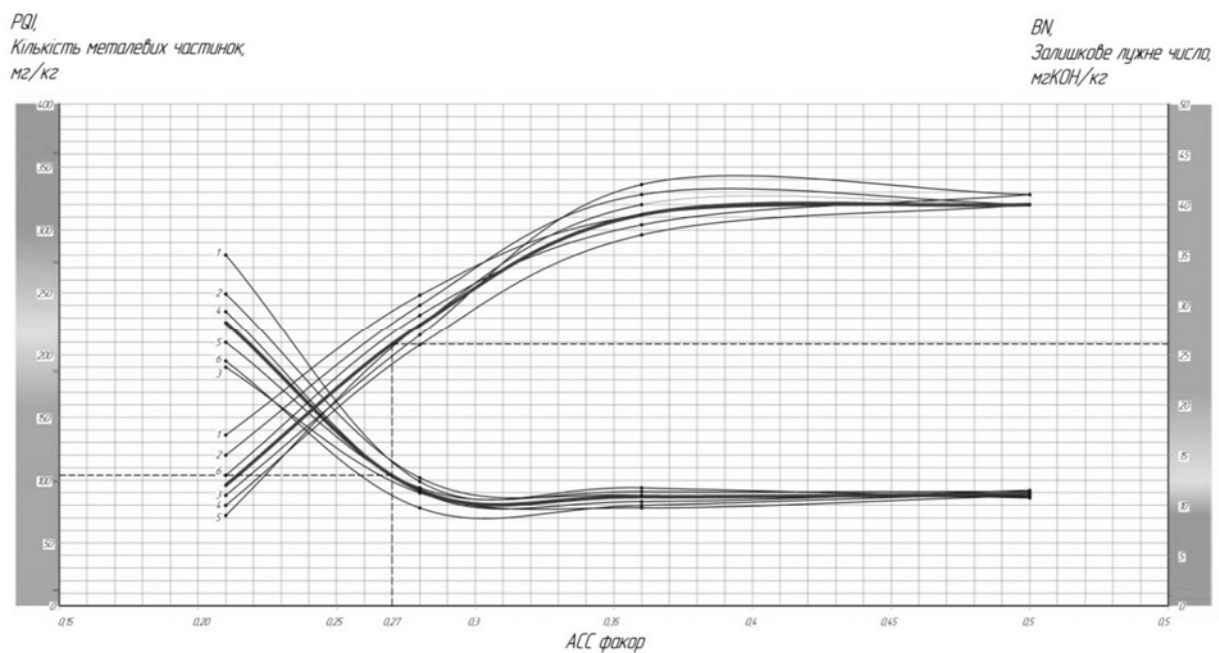


Рисунок 6 – Графік визначення оптимального АСС-фактора

Аналізуючи графік (рис. 6) ми бачимо, що концентрація PQI повільно піднімається до точки, де вона швидко зростатиме. Оптимальний АСС фактор знаходиться на графіках середніх показників PQI та BN, безпосередньо перед швидким збільшенням PQI, інше кажучи, до того як концентрація PQI досягає червоної області. Після того як коефіцієнт АСС був визначений відповідно до PQI, відповідне значення BN можна знайти за графіком.

Дослідження показало, що оптимальна витрата циліндрового масла для дизеля, що використовує паливо з високим вмістом сірки, досягається знаходженням оптимальної величини АСС-фактора. Його значення визначається для кожного двигуна окремо і залежить від його технічного стану та особливостей системи циліндрового масла. Значення

ACC-фактора є постійним і витрата циліндрового масла Feed Rate при переході на різні палива залежить тільки від вмісту в ньому сірки.

Після визначення оптимального ACC-фактору, його значення заноситься в пам'ять системи у блок управління системою «Alpha Lubricator».

Висновки. Результати досліджень з оптимізації витрат циліндрового масла дозволили визначити оптимальний ACC-фактор для конкретного двигуна MAN 6S70MC і прийняти його таким, що дорівнює 0,27 (FR=0,875 г/(кВт·год)). Це дозволило безпечно експлуатувати ЦПГ дизеля під час його роботи на паливі з вмістом сірки до 3% і визначити оптимальну витрату циліндрового масла. Дані фактори забезпечили економічно ефективний режим роботи дизеля при мінімальному корозійному зносі циліндрових втулок.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Артемов Г. А., Горбов В. М. Суднові енергетичні установки : навчальний посібник. Миколаїв : УДМТУ, 2002. 356 с.
2. Возницкий И. В. Техническая эксплуатация двигателей промышленных судов. Москва: Пищевая промышленность, 1969. 367 с.
3. Семенов А. В. Оптимизация расхода цилиндрового масла судовых малооборотных дизелей. *Судовые энергетические установки*. № 35. 2015. С. 169–179.
4. *Теплопрофи* : веб-сайт. URL : <https://www.teploprofi.com/seriya-varitherm-vt>.
5. Instruction Manuals 6S70MC-C, 2000.
6. Service Letter SL2013-571/JAP. Cylinder Lubrication Update, 2013.
7. Instruction MAN B&W. Alpha Adaptive Cylinder-oil Control Alpha ACC
8. *Environmental Ship Index Brochure*. URL : http://www.wpci.nl/docs/Environmental_Ship_Index_Brochure.pdf
9. Third IMO GHG Study 2014. Executive Summary and Report. IMO, 2015. 295 p.
10. *Environmental Ship Index (ESI)*. URL : <http://www.environmentalshipindex.org>.

REFERENCES

1. Artemov G. A., Gorbov V. M. (2002). *Sudnovi energetichni ustanovki : navchal'nyi posibnik*. Mikolaïv : UDMTU.
2. Voznickiy I. V. (1969). *Tekhnicheskaya ehkspluatatsiya dvigateley promishlennikh sudov*. Moskva: Pithevaya promishlennostj.
3. Semenov A. V. (2015). Optimizatsiya raskhoda cilindrovogo masla sudovihkh malooborotnihkh dizeleyj. *Sudovihe ehnergeticheskie ustanovki*, 35, 169–179.
4. Teploprofi : veb-sayjt. URL : <https://www.teploprofi.com/seriya-varitherm-vt>.
5. Instruction Manuals 6S70MC-C, 2000.
6. Service Letter SL2013-571/JAP. Cylinder Lubrication Update, 2013.
7. Instruction MAN B&W. Alpha Adaptive Cylinder-oil Control Alpha ACC
8. *Environmental Ship Index Brochure*. URL : http://www.wpci.nl/docs/Environmental_Ship_Index_Brochure.pdf
9. Third IMO GHG Study 2014. Executive Summary and Report. IMO, 2015. 295 p.
10. *Environmental Ship Index (ESI)*. URL : <http://www.environmentalshipindex.org>.

Самарин А. Е., Врублевский Р. Е. ОПТИМИЗАЦИЯ РАСХОДОВ ЦИЛИНДРОВОГО МАСЛА БЛАГОДАРЯ ОПТИМИЗАЦИИ АСС-ФАКТОРА

В статье описан метод оптимизации расхода цилиндрового масла для дизеля, использует топливо с высоким содержанием серы, достигается это нахождением оптимальной величины АСС-фактору. Цилиндрическое масло смешивается, чтобы достичь необходимого уровня мытья и диспергирования, чтобы сохранить поршневые кольца и втулку, а также необходимо базовое число (BN) для нейтрализации кислот, образованных во время сгорания. Цилиндрическое масло не только служит для смазки движущихся частей, но также предназначено для контроля степени коррозии на поверхности гильзы. Однако, чтобы обеспечить необходимый эффект смазки, увеличение образования кислоты потребует более высокого уровня BN, чем указано при минимальном режиме подачи. Это компенсируется путем вычисления скорости подачи на основе коэффициента АСС. Его

значение определяется для каждого двигателя отдельно и зависит от его технического состояния и особенностей системы цилиндрического масла. Значение ACC-фактора является постоянным и расход цилиндрического масла *Feed Rate* при переходе на разные топлива зависит только от содержания в нем серы. Исследование показало, что оптимальный расход цилиндрического масла для дизеля, использует топливо с высоким содержанием серы, достигается нахождением оптимальной величины ACC-фактора. Его значение определяется для каждого двигателя отдельно и зависит от его технического состояния и особенностей системы цилиндрического масла. Значение ACC-фактора является постоянным и расход цилиндрического масла *Feed Rate* при переходе на разные топлива зависит только от содержания в нем серы.

Ключевые слова: ACC-фактор, оптимизация, расход цилиндрического масла.

Samarin O. E., Vryblevskiy R. Ye. OPTIMIZATION OF CYLINDER OIL CONSUMPTION DUE TO ACC-FACTOR OPTIMIZATION

The article describes a method for optimizing the consumption of cylinder oil for a diesel engine, uses fuel with a high sulfur content, this is achieved by finding the optimal value for the ACC factor.

Cylinder oil is blended to achieve the correct wash and dispersion level to preserve the piston rings and bushing, and a base number (BN) is needed to neutralize acids generated during combustion. Cylinder oil not only serves to lubricate moving parts, but also serves to control the degree of corrosion on the liner surface. However, to provide the desired lubricating effect, an increase in acid production will require a higher BN level than indicated at the minimum feed rate. This is compensated for by calculating the feed rate based on the ACC factor. Its value is determined for each engine separately and depends on its technical condition and the characteristics of the cylinder oil system. The value of the ACC factor is constant and the feed rate of the cylinder oil when switching to different fuels depends only on the sulfur content in it.

The research has shown that the optimal consumption of cylinder oil for diesel, which uses fuel with a high sulfur content, is achieved by finding the optimal value of the ACC factor. Its value is determined for each engine separately and depends on its technical condition and the characteristics of the cylinder oil system. The ACC factor value is constant and the feed rate of the cylinder oil when switching to different fuels depends only on the sulfur content in it.

Keywords: ACC factor, optimization, cylinder oil consumption.

© Врублевський Р. Є., Самарін О. Є.

Статтю прийнято
до редакції 25.11.20

АДГЕЗІЙНІ ТА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НАПОВНЕНИХ ПОЛІСТИРОЛОМ «ОАЗИС» ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ТРАНСПОРТНОЇ ТЕХНІКИ

Кулініч В. Г., аспірант кафедри транспортних технологій Херсонської державної морської академії, e-mail: kulinich2000@yahoo.com, ORCID: 0000-0003-0323-8236

У роботі розглянуто перспективи використання полістиролу «Оазис» для формування композитних матеріалів із покращеними адгезійними та когезійними властивостями на основі епоксидного діанового олігомеру ЕД-20, який характеризується поліпшеною когезійною міцністю та незначною усадкою. Передбачено використання твердника ПЕПА для подальшого створення комплексних сполук із епоксидним олігомером. Досліджено вплив полістиролу «Оазис» на адгезійні та когезійні властивості епоксидної матриці. В результаті аналізу даних, отриманих після проведення експерименту, встановлено оптимальний вміст наповнювача, що забезпечує максимальні показники адгезійної міцності при відриві і зсуві, залишкових напружень, модуля пружності, руйнівних напружень при згинанні та ударної в'язкості. Отримання матеріалу із оптимальними показниками адгезійної міцності забезпечує введення наповнювача вмістом $q = 0,08$ мас.ч. в епоксидний олігомер ЕД-20. За такого вмісту отримали наступні показники: адгезійна міцність при відриві $\sigma_a = 37,2$ МПа, адгезійна міцність при зсуві - $\tau = 6,1$ МПа, залишкові напруження - $\sigma_z = 1,2$ МПа. Для формування композитних матеріалів із максимальними фізико-механічними властивостями доцільно використання добавки із вмістом $q = 0,06 \dots 0,08$ мас.ч., що забезпечує формування матеріалів із наступними показниками: руйнівні напруження при згинанні $\sigma_{z2} = 32,0 \dots 44,5$ МПа, модуль пружності при згинанні $E = 1,5 \dots 2,1$ Гпа. Оптимальним вмістом полістиролу для формування матеріалу із максимальним опором ударним навантаженням є $q = 0,02 \dots 0,08$ мас.ч., при якому ударна в'язкість складає $W = 9,3 \dots 11,8$ кДж/м². Неопосередкованим підтвердженням результатів проведених досліджень є аналіз макроструктури поверхні сколювання сформованих композитних матеріалів. Виявлено збіг тенденції розвитку поверхні сколювання, характерної для матеріалів із високими показниками когезійної міцності із зміною показників ударної в'язкості в залежності від вмісту полістиролу «Оазис». Після проведення загального оцінювання отриманих даних встановлено оптимальний вміст наповнювача при формуванні композитів із покращеними когезійними та адгезійними властивостями.

Ключові слова: композит, адгезійна міцність, руйнівні напруження при згинанні, ударна в'язкість, модуль пружності, наповнювач.

DOI: 10.33815/2313-4763.2020.2.23.080–091

Постановка проблеми. Світова промисловість постійно розвивається і вимагає розробки матеріалів із покращеними адгезійними та когезійними властивостями у зв'язку з необхідністю їхнього використання у вигляді покриттів для захисту деталей технологічного устаткування від корозії. Серед полімерних композитних матеріалів (КМ) окремо виділяють матеріали на епоксидній основі, які характеризуються оптимальним співвідношенням вартості та якості. У роботі використовували епоксидний олігомер ЕД-20, який відрізняється покращеними адгезійними та фізико-механічними властивостями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Авторами [1–8] проведено комплекс досліджень у напрямку розробки багатофункціональних захисних покриттів. Основними вимогами до даних матеріалів є підвищені адгезійна та когезійна міцність водночас із мінімальними значеннями залишкових напружень. Даної мети можливо досягти за допомогою наповнення епоксидної матриці дисперсними частками. При цьому необхідна наявність хімічної та фізичної міжфазової взаємодії при зшиванні композицій для отримання покриттів з поліпшеними властивостями. Перспективним при формуванні епоксидних КМ є використання у вигляді добавки полістиролу «Оазис» (ПО), який має активні групи, подібні до епоксидного олігомера ЕД-20. Це є цікавим з наукової точки зору через можливість створення КМ із покращеними експлуатаційними характеристиками. Крім цього дана робота є актуальною стосовно вирішення сучасних задач сучасної промисловості у напрямку використання вторинних ресурсів.

Мета роботи – дослідити вплив полістиролу «Оазис» на адгезійні та когезійні властивості епоксокомпозитних матеріалів.

Матеріали та методика досліджень. 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. Структурна формула фрагменту епоксидного діанового олігомеру ЕД-20 наведена на рис. 1 [5]. Як наповнювач використано частки полістиролу «Оазис». Дисперсні частки вводили у зв'язувач за вмісту від 0,02 до 0,50 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 наповнювача: $[\text{CH}_2\text{CH}(\text{C}_6\text{H}_5)]_n$. Молекулярна маса ПО складає 80...100 г/моль. Полістирол «Оазис» відрізняється підвищеною ударною стійкістю та відносно невисокою собівартістю. Крім того, через його широку розповсюдженість, відбувається постійне накопичення виробів, які вийшли з використання. Це надає можливість вторинної переробки полістиролу «Оазис», що, в свою чергу, є перспективним через зменшення рівня забруднення. Структурну формулу наповнювача наведено на рис. 2.

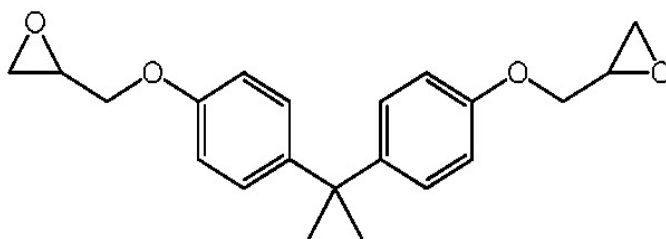


Рисунок 1 – Структурна формула фрагменту епоксидного діанового олігомеру ЕД-20 [5]

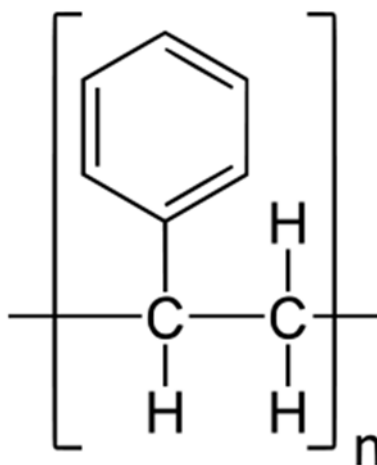


Рисунок 2 – Загальний вигляд хімічних зв'язків полістиролу «Оазис»

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: $[-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{NH}-]_n$. Структурну формулу фрагменту твердника ПЕПА наведено на рис. 3. Різні стадії зшивання моделювали і досліджували при введенні твердника у композицію за вмісту 10 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20 з метою визначення оптимального для відповідних характеристик співвідношення компонентів у системі «зв'язувач – модифікатор». Характеристики епоксидного діанового олігомеру, модифікатора і твердника наведено у табл. 1 і 2.

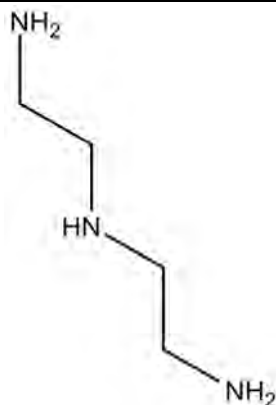


Рисунок 3 – Структурна формула фрагменту твердника ПЕПА [5]

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

Таблиця 2 – Фізичні властивості полістиролу

Фізичні властивості	Умовні позначення	Одиниці виміру	Числове значення
Густина	ρ	кг/м ³	1050
Температура склування	$T_{ск.}$	К	366
Температура самозаймання	$T_{сз.}$	К	713
Міцність при розтягу	$\sigma_{розг.}$	МПа	40...50
Модуль пружності при згинанні	E	ГПа	3,2
Відносне видовження	ϵ	%	1,2...2,0
Теплопровідність	λ	Вт(м·К)	0,08...0,12
Теплостійкість за Мартенсом	T	К	343
Міцність за Бринелем	НВW	МПа	140...200
Усадка при литті	α -	%	0,4...0,8
Питомий електричний опір	ρ_v	Ом·м	10^{12}
Діелектрична проникність	ϵ	–	2,5...2,6

Епоксидні композити і покриття на їх основі формували за наступною технологією: підігрівання смоли до температури $T = 353 \pm 2$ К і витримка при даній температурі впродовж часу $\tau = 20 \pm 0,1$ хв; суміщення олігомеру і наповнювача впродовж часу $\tau = 1 \pm 0,1$ хв; охолодження композиції до кімнатної температури впродовж

часу $\tau = 60 \pm 5$ хв; введення твердника і суміщення компонентів композиції впродовж часу $\tau = 5 \pm 0,1$ хв. Затверджували КМ за режимом: формування зразків та їх витримання впродовж часу $\tau = 12,0 \pm 0,1$ год за температури $T = 293 \pm 2$ К, нагрівання зі швидкістю $v = 3$ К/хв до температури $T = 393 \pm 2$ К, витримання впродовж часу $\tau = 2,0 \pm 0,05$ год, повільне охолодження до температури $T = 293 \pm 2$ К. З метою стабілізації структурних процесів у матриці зразки витримували впродовж часу $\tau = 24$ год на повітрі за температури $T = 293 \pm 2$ К з наступним проведенням експериментальних випробувань адгезійної міцності на зсув та відрив, залишкових напружень, руйнівних напружень, модуля пружності при згинанні, ударної в'язкості.

Адгезійну міцність матриці до металевої основи досліджували, вимірюючи руйнівні напруження («метод грибоків») при рівномірному відриві пари склеєних зразків згідно ГОСТ 14760 - 69. Дослідження адгезійної міцності при зсуві проводили згідно ГОСТ 14759 - 69, аналогічно вимірюючи силу відривання клейових з'єднань зразків на автоматизованій розривній машині УМ-5 при швидкості навантаження $v = 10$ м/с. Діаметр робочої частини зразків при відриві становив $d = 25$ мм. Слід зазначити, що площа склеювання зразків, які досліджували при відриві та зсуві, була однаковою.

Залишкові напруження у матриці визначали консольним методом [9]. Покриття товщиною $\delta = 0,3 \dots 0,8$ мм формували на металевій основі. Параметри основи: загальна довжина $l = 100$ мм, робоча довжина $l_0 = 80$ мм, товщина $\delta = 0,3$ 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 $l = 120 \pm 2$ мм, ширина $b = 15 \pm 0,5$ мм, висота $h = 10 \pm 0,5$ мм.

Ударну в'язкість визначали за методом Шарпі відповідно до ГОСТ 4647-80 на маятниковому копрі МК-30 при температурі $T = 298 \pm 2$ К і відносній вологості $d = 50 \pm 5$ %. Використовували зразки з такими параметрами: $(63,5 \times 12,7 \times 12,7) \pm 0,5$ мм. Відстань між опорами $40 \pm 0,5$ мм.

Відхилення значень при дослідженнях показників фізико-механічних властивостей КМ становило 4...6 % від номінального.

Результати досліджень та їх обговорення. На першому етапі досліджували адгезійну міцність при відриві КМ від сталюї основи Ст3 (σ_a). Адгезійна міцність при відриві має важливе значення серед практичних характеристик КМ. За допомогою даної властивості можливо проаналізувати характер дії міжмолекулярних сил міжфазової взаємодії. При попередніх дослідженнях встановлено величину адгезійної міцності при відриві модифікованої ультразвуком епоксидної матриці, яка становить $\sigma_a = 24,4$ МПа. Введення добавки за вмісту $q = 0,02$ мас.ч. призводить до зменшення показників адгезійної міцності КМ, позаяк її показники становлять $\sigma_a = 19,3$ МПа. Подальше збільшення вмісту наповнювача ($q = 0,06$ мас.ч.) приводить до незначного підвищення адгезійної міцності при відриві КМ до $\sigma_a = 19,5$ МПа. Збільшення вмісту часток до $q = 0,08$ мас.ч. забезпечує формування КМ із максимальними показниками адгезійної міцності ($\sigma_a = 37,2$ МПа) серед усього спектру досліджуваних матеріалів. Надалі збільшення вмісту добавки до $q = 0,10 \dots 0,50$ мас.ч. зумовлює зниження показників адгезійної міцності до $\sigma_a = 12,7 \dots 13,8$ МПа. Відмітимо, що позитивний вплив наповнювача ПО адгезійні властивості КМ спостерігали лише за вмісту часток у кількості $q = 0,08$ мас.ч. Передбачали покращення абсорбційної взаємодії за такого вмісту часток, що зумовлено рівномірним розподілом добавки у об'ємі зв'язувача і на поверхні субстрату. В цілому результати дозволяють стверджувати про послаблення сил міжфазової взаємодії у системі «епоксидний олігомер – наповнювач» за введення дисперсних часток. Однак, за вмісту наповнювача у кількості $q = 0,08$ мас.ч. спостерігали активацію процесів взаємодії бокових груп і сегментів епоксидного олігомеру з металевою основою та центрами на поверхні

дисперсної добавки, що є причиною підвищення показників адгезійної міцності КМ порівняно з епоксидною матрицею.

Надалі досліджували адгезійну міцність при зсуві КМ (τ). Доведено, що остання складає $\tau = 8,5$ МПа для вихідної матриці. Введення наповнювача в мінімальній кількості $q = 0,02$ мас.ч. забезпечує формування матеріалу з низькими значеннями дотичних напружень $\tau = 1,4$ МПа. Навпаки, подальше збільшення кількості часток ПО (у діапазоні $q = 0,06 \dots 0,08$ мас.ч.) приводить до утворення максимуму ($\tau = 6,1$ МПа) на кривій залежності адгезійної міцності при зсуві від вмісту наповнювача. Надалі за вмісту часток у кількості $q = 0,10 \dots 0,50$ мас.ч. відбувається зменшення показників адгезійної міцності при зсуві до $\tau = 3,9 \dots 4,2$ МПа.

Додатково у роботі досліджували залишкові напруження, які виникають при зшиванні захисних покриттів. Доведено (рис. 4), що введення часток наповнювача за незначного вмісту ($q = 0,02$ мас.ч.) забезпечує формування КМ з дещо меншими показниками напружень ($\sigma_3 = 1,0$ МПа) відносно епоксидної матриці ($\sigma_3 = 1,4$ МПа). Введення часток у діапазоні $q = 0,06 \dots 0,08$ мас.ч. сприяє збільшенню значень залишкових напружень до $\sigma_3 = 1,1 \dots 1,2$ МПа, а за вмісту часток у кількості $q = 0,10 \dots 0,50$ мас.ч. спостерігали зменшення напружень до $\sigma_3 = 0,8 \dots 1,0$ МПа. Тобто, досягнули позитивного ефекту, оскільки аналіз праць [8, 9] показує, що високі значення залишкових напружень сприяють розтріскуванню або відшаруванню адгезивів від металевої основи.

Відмітимо наявність симбатної кореляції максимальних показників адгезійної міцності при відриві, зсуві і залишкових напружень у діапазоні вмісту часток $q = 0,06 \dots 0,08$ мас.ч., що є підтвердженням достовірності проведених дослідів. Доведено, що оптимальним вмістом часток у КМ є $q = 0,08$ мас.ч., при якому всі три вказані вище параметри набувають максимальних значень.

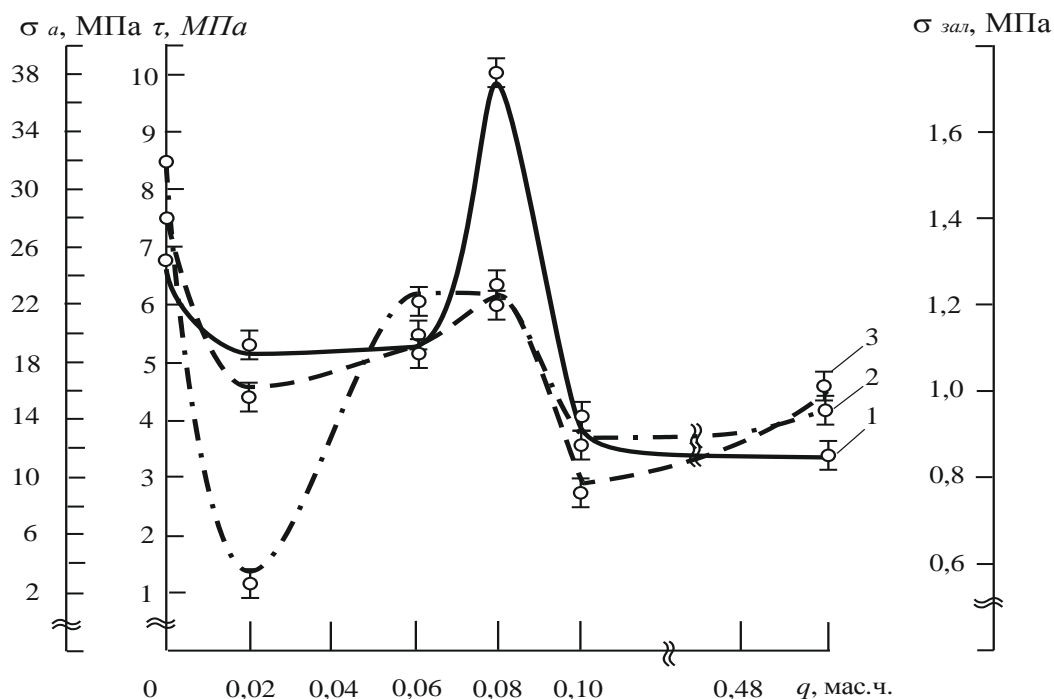


Рисунок 4 – Залежність адгезійної міцності на відрив (1), на зсув (2) і залишкових напружень (3) у КМ від вмісту наповнювача ПО

Наступним етапом було дослідження комплексу фізико-механічних властивостей КМ. Попередньо встановили фізико-механічні властивості обробленої ультразвуком епоксидної матриці: модуль пружності при згинанні $E = 2,8$ ГПа, руйнівні напруження при згинанні $\sigma_{32} = 48,0$ МПа, ударна в'язкість $W = 7,4$ кДж/м². Встановлено (рис. 5), що введення ПО за незначного вмісту ($q = 0,02$ мас.ч.) призводить порівняно з матрицею до зниження модуля пружності КМ ($E = 2,1$ ГПа). Мінімум на кривій залежності «E – q»

спостерігали за вмісту часток у кількості $q = 0,06$ мас.ч. Для такого матеріалу модуль пружності становить $E = 1,5$ ГПа. Подальше збільшення кількості ПО до $q = 0,08$ мас.ч. забезпечує часткове збільшення показників досліджуваної характеристики до $E = 2,1$ ГПа, а за вмісту часток у кількості $q = 0,10 \dots 0,50$ мас.ч. також формуються КМ із незначними пружними показниками. Для них модуль пружності при згинанні становить $E = 1,1$ ГПа.

Додатково визначали величину руйнівних напружень при згинанні розроблених КМ. Встановлено (рис. 5), що введення у епоксидний зв'язувач наповнювача ПО за вмісту $q = 0,02 \dots 0,06$ мас.ч. призводить до зниження значень руйнівних напружень від $\sigma_{32} = 48,0$ МПа (для епоксидної матриці) до $\sigma_{32} = 13,0 \dots 25,4$ МПа. Введення часток ПО за вмісту $q = 0,08$ мас.ч. забезпечує формування КМ із максимальними показниками руйнівних напружень ($\sigma_{32} = 44,5$ МПа) серед усього спектру досліджуваних КМ. Подальше збільшення кількості наповнювача (у діапазоні $q = 0,10 \dots 0,50$ мас.ч.) також призводить до зменшення показників руйнівних напружень КМ до $\sigma_{32} = 31,4 \dots 32,8$ МПа. Відмітимо наявність симбатної кореляції на усьому діапазоні концентрацій добавки ПО на кривих « $\sigma_{32} - q$ » і « $E - q$ ». Слід зазначити, що показники досліджуваних когезійних характеристик розроблених композитів є нижчими порівняно з епоксидною матрицею.

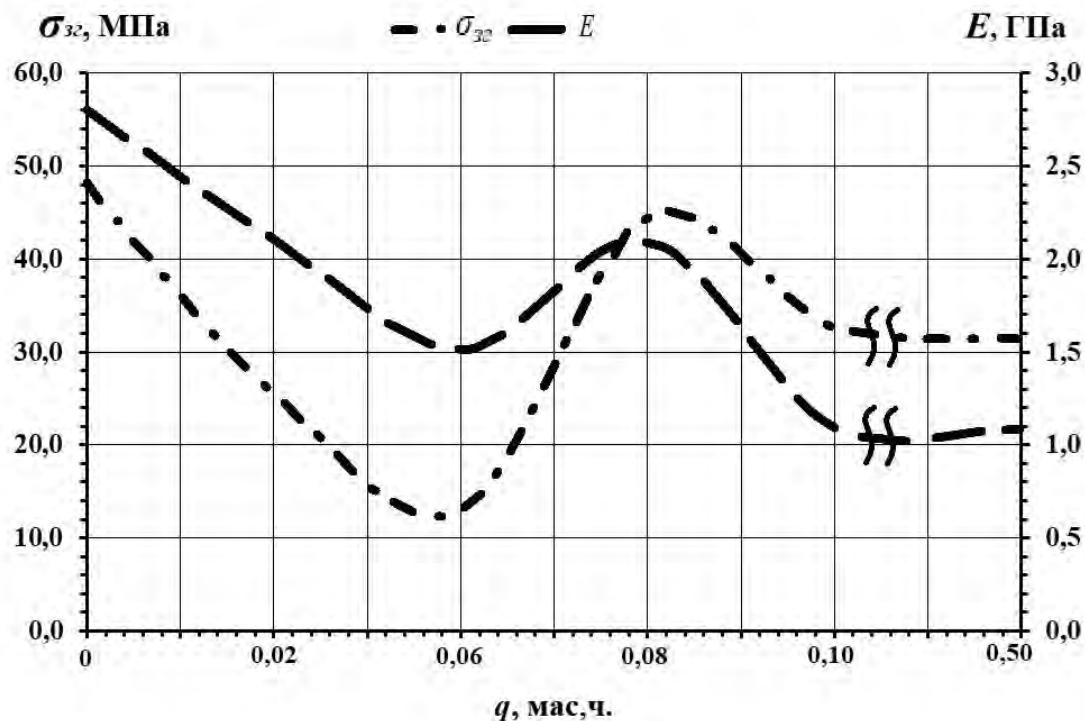


Рисунок 5 – Залежність модуля пружності та руйнівних напружень при згинанні КМ від вмісту наповнювача ПО

Цікаві результати були отримані при дослідженні ударної в'язкості КМ. За незначного вмісту ПО ($q = 0,02$ мас.ч.) отримали матеріал із максимальним значенням (серед усього спектру досліджуваних матеріалів), ударна в'язкість якого становить $W = 11,8$ кДж/м². Відмітимо, що ударна в'язкість даного КМ перевищує аналогічні показники для модифікованої УЗО матриці ($W = 7,4$ кДж/м²) у 1,6 разів. Додавання часток у кількості $q = 0,06$ мас.ч. також поліпшує в'язкість КМ при ударі, хоча не так суттєво. Для даного КМ ударна в'язкість становить $W = 10,3$ кДж/м². Надалі збільшення вмісту ПО ($q = 0,08 \dots 0,50$ мас.ч.) призводить до монотонного зменшення показників ударної в'язкості КМ до $W = 6,1$ кДж/м². У цілому відмітимо позитивний вплив полістиролу «Оазис» на в'язкість КМ при ударі. Критичним вмістом обрано кількість наповнювача – $q = 0,02 \dots 0,08$ мас.ч. Формування таких матеріалів забезпечує суттєве підвищення показників ударної в'язкості порівняно з епоксидною матрицею. Крім того, слід зазначити,

що максимальні значення досліджуваних механічних властивостей отримано для КМ із вмістом часток у кількості $q = 0,08$ мас.ч., що є підтвердженням достовірності проведених експериментів.

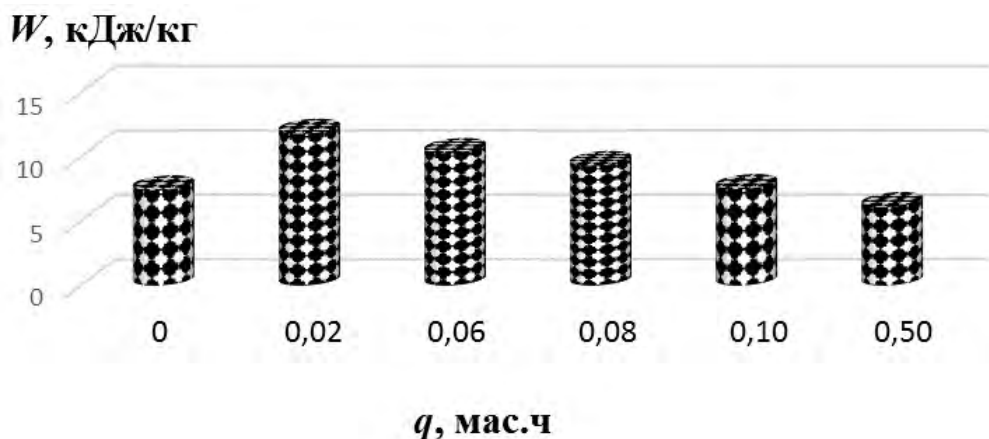
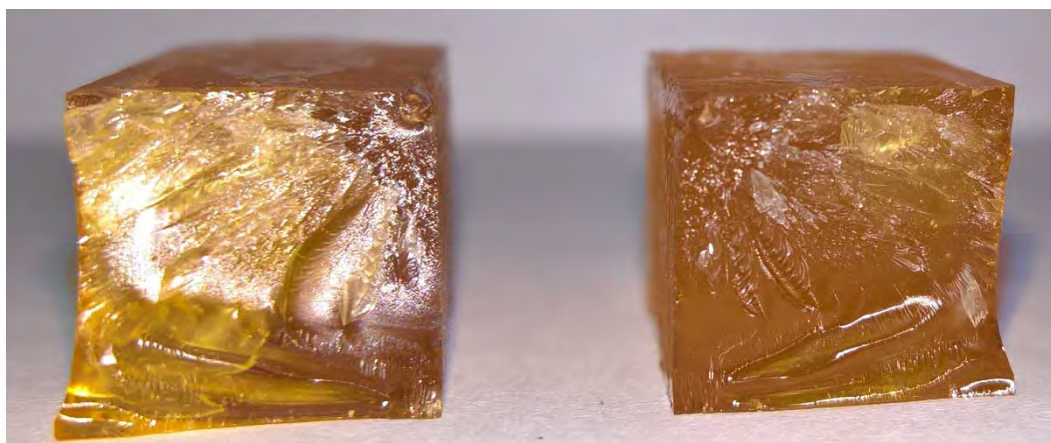


Рисунок 6 – Залежність ударної в'язкості КМ від вмісту наповнювача ПО

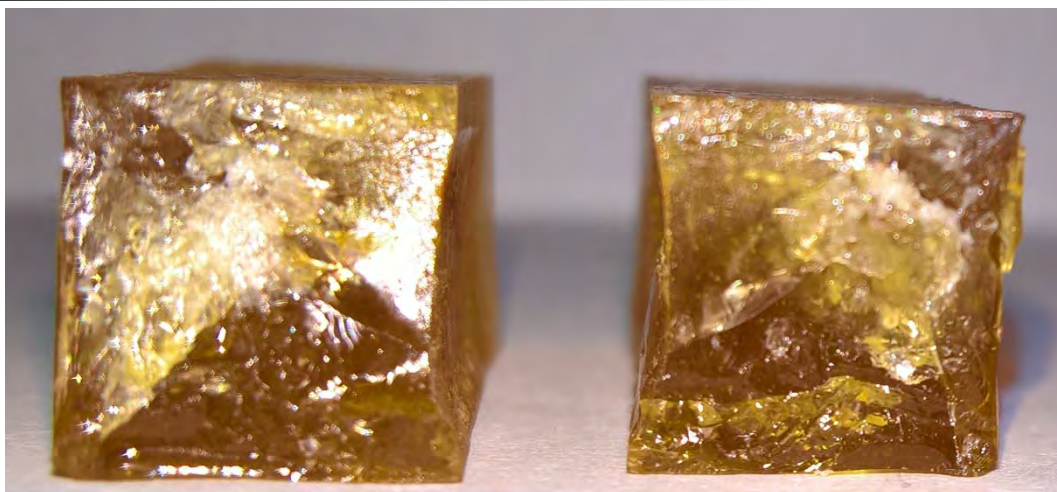
На завершальному етапі аналізували мікросвітлини поверхні зламу КМ (рис.7, а-е). Показано, що поверхня зламу модифікованої УЗО матриці містить переважно ділянки з тріщинами і поперемінно шорсткою поверхнею.



а) епоксидна матриця (контрольний зразок)



б) $q = 0,02$ мас.ч.



в) $q = 0,06$ мас.ч.



г) $q = 0,08$ мас.ч.



д) $q = 0,10$ мас.ч.

е) $q = 0,50$ мас.ч.

Рисунок 7 – Мікросвітлини поверхні зламу КМ за різного вмісту наповнювача ПО

При введенні ПО за вмісту $q = 0,02$ мас.ч. отримали поверхню сколювання гладкого вигляду. Зазвичай подібні поверхні мають зразки із високим запасом когезійної міцності. Поверхня зламу КМ із вмістом часток у кількості $q = 0,06$ мас.ч. характеризується гетерогенними ділянками, що відрізняються гладкими і водночас шорсткими областями. Це є свідченням крихкого механізму руйнування і зменшення показників когезійних характеристик. Аналіз поверхні сколювання КМ із наповнювачем у кількості $q = 0,08$ мас.ч. дозволяє констатувати про аналогічні результати із попереднім зразком. При цьому слід зазначити, що відсоток гладкої поверхні стає дедалі меншим. Введення часток ПО у діапазоні $q = 0,10 \dots 0,50$ мас.ч. забезпечує формування КМ із значним відсотком шорсткої поверхні сколювання, що характерно для механізму крихкого руйнування. Відмітимо наявність збігу зміни вигляду поверхні сколювання із результатами дослідження ударної в'язкості КМ, що додатково підтверджує достовірність проведених досліджень. Крім того, на наведених світлинах макроруйнування чітко простежується тенденція зміни вигляду поверхні залежно від вмісту наповнювача, яка є ідентичною до типових характеристик руйнувань.

Висновки. У роботі встановлено вплив дисперсних часток полістиролу «Оазис» у вигляді наповнювача для епоксидного олігомеру ЕД-20 на адгезійні та фізико-механічні властивості композитів. У результаті експерименту можна констатувати наступне.

1. Встановлено, що для отримання матеріалу з підвищеними показниками адгезійних властивостей у епоксидний зв'язувач слід вводити наповнювач у вигляді часток полістиролу «Оазис» за вмісту $q = 0,08$ мас.ч. Формування такого композиту забезпечує підвищення порівняно з модифікованою ультразвуком епоксидною матрицею адгезійної міцності при відриві від $\sigma_a = 24,4$ МПа до $\sigma_a = 37,2$ МПа, адгезійна міцність при зсуві при цьому зменшується від $\tau = 8,5$ МПа до $\tau = 6,1$ МПа, а залишкові напруження – від $\sigma_3 = 1,4$ МПа до $\sigma_3 = 1,2$ МПа. Покращення абсорбційної взаємодії за такого вмісту часток зумовлено рівномірним розподілом добавки у об'ємі зв'язувача і на поверхні субстрату. Вважали, що за вмісту наповнювача у кількості $q = 0,08$ мас.ч. відбувається активація процесів взаємодії бокових груп і сегментів епоксидного олігомеру з металевою основою та центрами на поверхні дисперсної добавки. Це є причиною підвищення показників адгезійної міцності композитів порівняно з епоксидною матрицею.

2. Доведено, що для формування композитів із максимальними показниками фізико-механічних властивостей доцільно використовувати у вигляді наповнювача частки полістиролу «Оазис» за вмісту $q = 0,06 \dots 0,08$ мас. ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20. Такі матеріали характеризуються наступними властивостями: руйнівні напруження при згинанні $\sigma_{3z} = 32,0 \dots 44,5$ МПа, модуль пружності при згинанні $E = 1,5 \dots 2,1$ ГПа. Крім

того, зазначимо, що для формування матеріалів, які працюють в умовах ударних навантажень, у епоксидний зв'язувач необхідно вводити як наповнювач полістирол «Оазис» за вмісту $q = 0,02$ мас. ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20. Це забезпечує збільшення показників ударної в'язкості від $W = 7,4$ кДж/м² (для епоксидної матриці) до $W = 11,8$ кДж/м².

3. Додатково проведено дослідження макроструктури зламу композитів. Найбільший відсоток площі гладкої поверхні, характерної для матеріалів із високим запасом когезійної міцності, спостерігали за вмісту наповнювача полістиролу «Оазис» у кількості $q = 0,02 \dots 0,08$ мас. ч., що забезпечує оптимальні показники фізико-механічних характеристик сформованих матеріалів.

4. Спостерігали позитивний ефект у вигляді покращення адгезійних властивостей матеріалів при введенні наповнювача за оптимального вмісту та одночасне погіршення показників фізико-механічних характеристик композитів. Вважали, що надалі є доцільним проводити ультразвукову обробку композицій перед введенням твердника. Це, на наш погляд, дозволить ефективніше змішувати композиції, що приведе до поліпшення когезійних властивостей розроблених епоксикомпозитів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Demchenko V. L., Yurzhenko M. V. Peculiarities of constant magnetic field effect on the nanostructural organization and properties of hard-to-weld polyethylene polypropylene joints. *2017 IEEE Nanomaterials: Applications and Properties*, 2017, P. 03NNSA10-1–03NNSA10-3. URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/8190258>

2. Словник-довідник зі зварювання та склеювання пластмас / М.В. Юрженко та ін.; за ред. Б.Є. Патона. Київ : Наукова думка, 2018. 368 с.

3. Mamunya Ye., Iurzhenko M., Lebedev E., Levchenko V., Chervakov O., Matkovska O., Sverdlikovska O. *Electroactive polymer materials: monograph*. Kyev : Alpha-Reklama, 2013. 402 p.

4. Юрженко М. В., Кораб М. Г. *Зварювання високотехнологічних пластмас*. Суми : Університетська книга, 2016. 319 с.

5. Букетов А. В., Акимов А. В., Зинченко Д. А. Исследование физико-механических свойств композитных материалов на основе эпоксидиановой смолы, отвержденной полиэтиленполиамином, с добавлением пластификатора-антипирена трихлорэтилфосфата. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2015. № 5. С. 126–134.

6. 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.

7. Старокадомский Д. Л. Влияние дисперсности и концентрации аэросила в составе полиэпоксидных композиций на их набухание в кислых средах. *Український хімічний журнал*. 2010. №7–8. С. 89–96.

8. Сапронов О. О., Нігалатій В. Д., Клевцов К. М., Смирнов І. В., Долгов М. А. Вплив вмісту і природи дрібнодисперсного наповнювача на механічні властивості і структуру полімерних захисних покриттів. *Вісник Херсонської державної морської академії*. 2013. №2(9). С. 228–237.

9. Корякина М. И. Испытание лакокрасочных материалов и покрытий. Москва : Химия, 1988. 272 с.

REFERENCES

1. Demchenko, V.L. & Yurzhenko, M.V. (2017). Peculiarities of constant magnetic field effect on the nanostructural organization and properties of hard-to-weld polyethylene

polypropylene joints. 2017 *IEEE Nanomaterials: Applications and Properties*, 03NNSA10-1 - 03NNSA10-3. Retrieved from <http://ieeexplore.ieee.org/document/8190258>.

2. Yurzhenko M. V. et al. (2018). *Slovník-dovídník z vývoje a výroby plastů*. Paton B. Ye. (Ed.). Kyev : Naukova dumka.

3. Mamunya Ye et al. (2013). *Electroactive polymer materials: monograph*. Kyev : Alpha-Reklama.

4. Yurzhenko, M. V., & Korab M. G. (2016). *Vývoj vysokotechnologických plastů*. Sumy : Universytetska knyha.

5. Buketov A. V., Akymov A. V., & Zynchenko D. A. (2015). Issledovanie fiziko-mekhanicheskikh svoystv kompozitnykh materialov na osnove epoksidianovoy smolyi, otverzhdennoy polietilenpoliaminom, s dobavleniem plastifikatora-antipirena trihloretilfosfata. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky*, 5, 126–134.

6. Buketov A. V. & Saprónov O. O. (2013). Doslidzhennia zalezhnosti vlastyvoitei epoksydnykh kompozytiv vid vmistu dyspersnykh napovniuvachiv z metoiu formuvannia zakhysnykh pokryttiv dlia pidiomno-transportnykh mekhanizmiv. *Pidiomno-transportna tekhnika*, 3(39), 92–107.

7. Starokadomskiy D. L. (2010). Vliyanie dispersnosti i kontsentratsii aerosila v sostave poliepoksidnykh kompozitsiy na ih nabuhanie v kislykh sredah. *Ukr. him. zhurn*, 7–8, 89–96.

8. Saprónov O. O., Nihalatii V. D., Klevtsov K. M., Smyrnov I. V. & Dolhov M. A. (2013). Vplyv vmistu i pryrody dribnodispersnoho napovniuvacha na mekhanichni vlastyvoitei i strukturu polimernykh zakhysnykh pokryttiv. *Visnyk KhDMA*, 2(9), 228–237.

9. Koryakina M. I. (1988). *Ispytanie lakokrasochnykh materialov i pokrytiy*. Moskva : Khimiya.

Кулинич В. Г. АДГЕЗИОННЫЕ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАПОЛНЕННЫХ ПОЛИСТИРОЛОМ «ОАЗИС» ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ТРАНСПОРТНОЙ ТЕХНИКИ

В работе рассмотрены перспективы использования полистирола «Оазис» для формирования композитных материалов с улучшенными адгезионными и когезионными свойствами на основе эпоксидного дианового олигомера ЭД-20, который характеризуется улучшенной когезионной прочностью и незначительной усадкой. Предусмотрено использование отвердителя ПЕПА для последующего создания комплексных соединений с эпоксидным олигомером. Исследовано влияние полистирола «Оазис» на адгезионные и когезионные свойства эпоксидной матрицы. В результате анализа данных, полученных после проведения эксперимента, установлено оптимальное содержание наполнителя, обеспечивающее максимальные показатели адгезионной прочности при отрыве и сдвиге, остаточных напряжений, модуля упругости, разрушающих напряжений при изгибе и ударной вязкости. Формирование материала с оптимальными показателями адгезионной прочности обеспечивает введение наполнителя содержанием $q = 0,08$ масс.ч. в эпоксидный олигомер ЭД-20. При таком содержании получили следующие показатели: адгезионная прочность при отрыве $\sigma_a = 37,2$ МПа, адгезионная прочность при сдвиге – $\tau = 6,1$ МПа, остаточные напряжения – $\sigma_{ост} = 1,2$ МПа. Для формирования композитных материалов с оптимальными физико-механическими свойствами целесообразно использование добавки с содержанием $q = 0,06 \dots 0,08$ масс.ч., что обеспечивает формирование материалов со следующими показателями: разрушительные напряжения при изгибе $\sigma_{изг} = 32,0 \dots 44,5$ МПа, модуль упругости при изгибе $E = 1,5 \dots 2,1$ ГПа. Оптимальным содержанием полистирола для формирования материала с максимальным сопротивлением ударным нагрузкам является $q = 0,02 \dots 0,08$ масс.ч., при котором ударная вязкость составляет $W = 9,3 \dots 11,8$ кДж/м². Непосредственным подтверждением результатов проведенных исследований является анализ макроструктуры поверхности скалывания сформированных композитных материалов. Выявлено совпадение тенденции развития поверхности, характерной для материалов с высокими показателями когезионной прочности с изменением показателей ударной вязкости в зависимости от содержания полистирола «Оазис». После проведения общей оценки полученных данных установлено оптимальное содержание наполнителя при формировании композитов с улучшенными когезионными и адгезионными свойствами.

Ключевые слова: композит, адгезия, разрушающие напряжения при изгибе, ударная вязкость, модуль упругости, наполнитель.

Kulinich V. G. ADHESIVE AND PHYSICAL MECHANICAL PROPERTIES OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS, FILLED BY POLYSTYRENE «OASIS» FOR TRANSPORT EQUIPMENT *The prospects of polystyrene «Oasis» usage for the formation of composite materials with improved adhesion and cohesion properties based on epoxy diene oligomer ED-20, which is characterized by improved cohesive strength and low shrinkage. The usage of PEPA hardener is provided for further creation of complex compounds with epoxy oligomer. The influence of "Oasis" polystyrene on the adhesion and cohesion properties of the epoxy matrix was studied. As a result of the data's analysis, obtained after the experiment, the optimal content of filler was established, which provides maximum adhesion strength at shear and shifting, residual stresses, modulus of elasticity, destructive bending stresses and impact strength. Obtaining a material with optimal adhesion strength provides the adding of a filler with a content of $q = 0,08$ mass.% in epoxy oligomer ED-20. The following parameters were obtained for this content: adhesion strength at separation $\sigma_a = 37,2$ MPa, adhesive strength at shear $\tau = 6,1$ MPa, residual stresses $\sigma_{res} = 1,2$ MPa. For the formation of composite materials with maximum physical and mechanical properties, it is advisable to use an additive with a content of $q = 0,06...0,08$ mass.% including the formation of materials with the following indicators: destructive bending stresses $\sigma_{dest} = 32,0... 44,5$ MPa, modulus of elasticity in bending $E = 1,5...2,1$ GPa The optimal content of polystyrene for the formation of material with maximum impact resistance the load is $q = 0,02...0,08$ mass.% including, at which the impact strength is $W = 9.3...11.8$ kJ/m² Indirect confirmation of the research's results is the analysis of the of the shear surfaces' macrostructure of the formed composite materials. The tendency of shear surface development characteristic for materials with high indicators of cohesive strength with the change of impact strength depending on the content of polystyrene "Oasis" is revealed. After a general evaluation of the obtained data, the optimal content of filler in the formation of composites with improved cohesion and adhesion properties was established.*

Keywords: composite, adhesion, fracture bending stress, toughness, modulus, filler.

© Кулініч В. Г.

Статтю прийнято
до редакції 26.08.20

СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ ВПРЫСКИВАНИЯ ТОПЛИВА СУДОВОГО СРЕДНЕОБОРОТНОГО ДИЗЕЛЯ

Половинка Э. М., д.т.н., профессор кафедры судовых энергетических установок Национального университета «Одесская морская академия», e-mail: Polovinkaem18@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6855-1269;

Слободянюк Н. В., преподаватель кафедры корабельных электроэнергетических систем Института военно-морских сил Национального университета «Одесская морская академия», e-mail: Nikgavr1234@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2248-0255

Гидродинамические процессы в системе впрыскивания топлива в дизельных двигателях вызывает научных интерес исследования, что обусловлено формированием экономических параметров работы дизелей в целом.

На кафедре судовых энергетических установок Национального университета «Одесская морская академия» выполнено экспериментальное исследование процесса топливоподачи дизельной топливной аппаратуры на неустановившихся и частичных режимах. Экспериментальное исследование проводилось на безмоторном стенде, оборудованном программно-аппаратным комплексом «тензостанция» и программно-аппаратным электромеханическим комплексом управления положением рейки топливного насоса высокого давления, что дало возможность получить экспериментальные значения гидродинамических процессов в топливной аппаратуре судового среднеоборотного дизеля в динамическом режиме.

Объектом исследования являются гидродинамические процессы в топливной системе высокого давления при работе на скоростной и нагрузочной характеристике. Предметом исследования является взаимосвязь параметров топливоподачи с режимными и регулировочными факторами, а также анализ статистических параметров полученных регрессионных моделей

В работе представлены результаты моделирования характеристик системы топливоподачи судового среднеоборотного дизеля, в форме статистических зависимостей основных показателей впрыскивания от регулировочных и эксплуатационных параметров, так как данная форма является оптимальной для составления аналитических моделей с оформлением результатов в форме регрессионных зависимостей.

Сформированные регрессионные модели отображают взаимосвязь параметров процесса впрыскивания для скоростной и нагрузочной характеристики судового среднеоборотного дизеля.

Проведенное исследование показало статистическую значимость представленных моделей (угла впрыскивания, давления топлива в штуцере топливного насоса, давления в топливном канале форсунки от частоты вращения распределительного вала) и их пригодность в оценке скоростной и нагрузочной характеристик судового среднеоборотного дизеля.

Ключевые слова: *среднеоборотный дизель, топливная аппаратура, переменные режимы, нагрузочная характеристика, скоростная характеристика, динамические испытания, статистические модели.*

DOI: 10.33815/2313-4763.2020.1.22.092-107

Введение. Исследования в области усовершенствования систем впрыскивания топлива выполняются различными методами. Наряду с традиционным методом представления характеристик систем топливоподачи дизелей, в графическом виде и в форме аналитических моделей эффективным является статистическая обработка экспериментальных данных с оформлением результатов в форме регрессионных зависимостей. Такой подход использован в данной работе при анализе результатов измерения параметров топливоподачи судового среднеоборотного дизеля, полученных в ходе безмоторных динамических стендовых испытаний. Условия эксперимента соответствовали скоростной и нагрузочной характеристикам. Обработка данных с расчетом статистик регрессионных уравнений осуществлена с помощью пакета STATISTICA.

Объект исследования и его технологический аудит. *Объектом исследования являются гидродинамические процессы в топливной системе высокого давления при работе на скоростной и нагрузочной характеристике.*

Предметом исследования является взаимосвязь параметров топливоподачи с режимными и регулировочными факторами, а также анализ статистических параметров полученных регрессионных моделей.

Исследование проведено на безмоторном стенде в условиях динамических испытаний, с использованием, созданного для данной работы измерительного и электромеханического комплекса, с компьютерным управлением режимов эксперимента и записью параметров топливоподачи.

Обработка экспериментальных данных и подготовка массивов информации для пакета статистического анализа проведена средствами блока измерительного комплекса.

По данным статистического анализа определена предпочтительная форма регрессионных моделей.

Цель и задачи исследования. *Целью исследования* является получение математической модели процессов в топливной системе высокого давления для скоростной и нагрузочной характеристик судового среднеоборотного дизеля.

Для выполнения цели необходимо выполнить следующие задачи:

– определить исходный материал для исследования качества. Принять за основу экспериментальные данные, полученные в работах [1, 2];

– сформировать регрессионные уравнения зависимости угла впрыскивания, давления топливного насоса высокого давления (ТНВД), давление в топливном канале форсунки от положения рейки и скорости вращения распределительного вала с оценкой статистических характеристик полученных моделей.

Исследование существующих решений проблемы. В работах [3, 4, 5, 6] исследованы динамические характеристики транспортного дизеля, работающего в условиях переменных нагрузок. Судовые дизели во многих случаях также эксплуатируются при частом изменении нагрузки – пуски, остановки, реверс, воздействие порывов ветра, ударные воздействия волн. При этом минимальное время приема нагрузки является немаловажным фактором управляемости судном. Проведен анализ влияния характера изменения начального давления в системе топливоподачи на длительность переходного процесса. Показано, что параметры переходного процесса в топливной аппаратуре дизеля могут положительно или отрицательно сказываться на динамических качествах дизеля.

В [7, 8, 9] проведена оценка экономичности дизеля на неустановившихся режимах работы. По результатам обработки данных эксперимента превышение расхода топлива при переходном процессе под нагрузкой относительно установившегося режима получено равным – 43 %, а в режиме холостого хода – 25 %.

Приведенные данные свидетельствуют о важности процессов топливоподачи при формировании динамических характеристик дизелей. Это подтверждает целесообразность исследований, результаты которых представлены авторами в публикуемой статье, включая установление статистических закономерностей для параметров впрыскивания топлива.

Методы исследования. Экспериментальные показатели топливоподачи, использованные для статистической обработки, получены в результате динамических испытаний по скоростной и нагрузочной характеристиках системы впрыскивания дизеля 6ЧН25/34 на безмоторном стенде [10]. Общий вид стенда с установленной топливной аппаратурой и датчиками для регистрации параметров впрыскивания представлены на фотографии рис. 1.

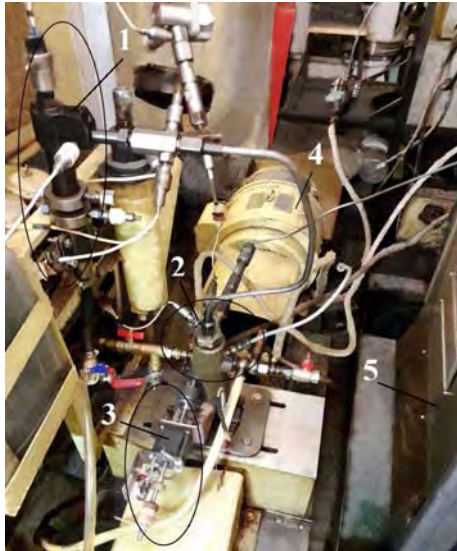


Рисунок 1 – Безмоторний стенд для дослідження топливної апаратури:

1 – форсунка; 2 – топливний насос високого тиску; 3 – пристрій, що керує переміщенням рейки ТНВД; 4 – електродвигач; 5 – станція управління електродвигачем.

Безмоторний стенд обладнаний комп'ютерною вимірною та керуючою системою в складі:

– програмно-апаратного комплексу «тензостанція»;

– програмно-апаратного електромеханічного комплексу управління положенням рейки ТНВД.

В ході експериментального дослідження вимірною системою реєструвалися:

- тиск палива в штуцері топливного насоса p_n ;
- тиск палива на вході в форсунку $p_{ф.вх}$;
- тиск в топливній каналі форсунки $p_{ф.к}$;
- ход игли розпилювача (форсунки) z ;
- визначалася частота обертання розподільного вала n_p ;
- фіксувався кут повороту розподільного вала ϕ ;
- вимірювався час t ;
- переміщення рейки ТНВД m_p .

Навантажувальна характеристика отримана шляхом ступінчастого переміщення рейки ТНВД відповідно до заданої циклограми при постійній напрузі електродвигача стенда. Швидкісна характеристика реалізована при розгоні та вибігу стенда.

Методика дослідження включає статистичний аналіз параметрів навантажувальної та швидкісної характеристик.

Статистичний аналіз гідродинамічних показувальних параметрів впорскування палива, отриманих при динамічних випробуваннях за навантажувальною характеристикою, виконаний за експериментальними даними, представленими в [1].

Графічне представлення ходу експерименту зображено на графіках рис. 2. Використовується часовий масштаб, відповідний моменту запису розглянутих показувальних параметрів. Одночасно вказується номер циклу на комп'ютерній осцилограмі.

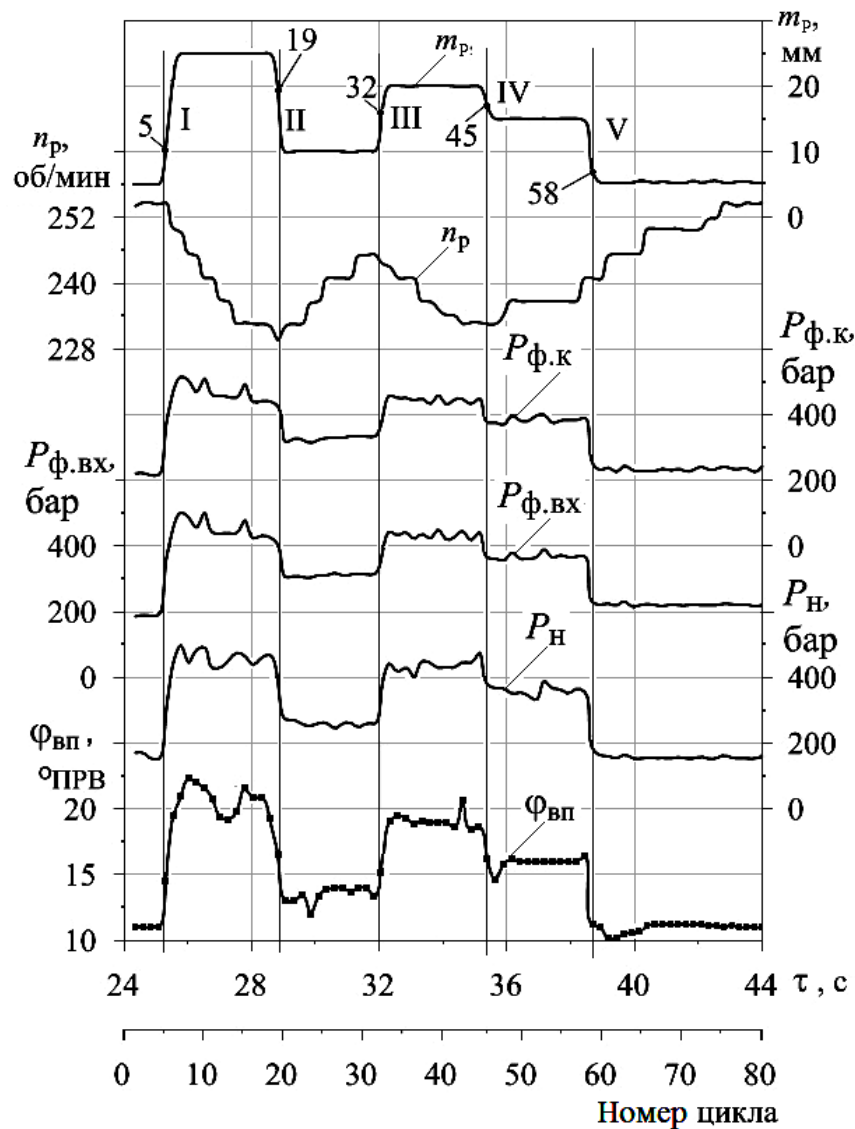


Рисунок 2 – Параметры топливоподачи на режимах нагрузочной характеристики при динамических испытаниях:

I – $m_p = 5\text{--}25$ мм; II – $25\text{--}10$ мм; III – $10\text{--}20$ мм; IV – $20\text{--}15$ мм; V – $15\text{--}05$ мм; 5, 19, 32, 45, 58 – номера циклов при перемещении рейки

Параметры экспериментального исследования получены в условиях динамических испытаний при постоянном напряжении электродвигателя безмоторного стенда. В результате при колебаниях нагрузки, вызванных перемещением рейки ТНВД, наблюдалось некоторое изменение частоты вращения распределительного вала. Границы изменения частоты вращения n_p составили $233\text{--}255$ об/мин, что соответствует 9 % или $\pm 4.5\%$ от среднего значения.

Для решения вопроса о статистической значимости изменения n_p в полученном диапазоне проведен анализ совместного влияния положения рейки m_p и n_p на величину угла впрыскивания $\varphi_{вп}$. Используя пакет STATISTICA, получено двухфакторное регрессионное линейное уравнение:

$$\varphi$$

Статистические параметры модели представлены в табл. 2, 3. Для оценки значимости частоты вращения рассмотрим два показателя: уровень значимости p и

Таблиця 2 – Статистические параметры модели

<i>Одномерные критерии значимости для $\varphi_{вп}$</i>					
Эффект	SS	Степени свободы	MS	F	p
Св.член	1,6728	1	1,6728	9,561	0,003074
m_p	438,8614	1	438,8614	2508,426	0,0
n_p	0,0494	1	0,0494	0,2823	0,597274
Ошиб.	9,9724	57	0,1750	-	-

Таблиця 3 – Статистические параметры модели

<i>Оценки параметров</i>						
Эффект	$\varphi_{вп}$ Парам.	$\varphi_{вп}$ Ст.Ош.	$\varphi_{вп}$ t	$\varphi_{вп}$ p	$\varphi_{вп}$ Бета (?)	$\varphi_{вп}$ Ст. Ош.2
Св.член	7,4168	2,39861	3,0921	0,0307	-	-
m_p	0,4932	0,00985	50,0842	0,0	0,9997	0,01996
n_p	0,0051	0,00957	0,5313	0,5313	0,0106	0,01996

Используемые сокращения в таблицах (для русскоязычной версии STATISTICA):

- эффект – члены уравнения регрессии и ошибка (остатки);
- параметр – коэффициенты при факторах;
- SS (Sums of Squares) – сумма квадратов отклонений значений от среднего для модели или эффекта;
- SS модели – сумма квадратов отклонений предсказанных значений от среднего;
- SS остаток – сумма квадратов отклонений остатков от среднего по остаткам;
- MS (Mean of Squares) – дисперсия, сумма квадратов отклонений, приходящаяся на одну степень свободы;
- множество R – коэффициент множественной корреляции;
- множество R2 – коэффициент детерминации;
- скоррект. R2 – скорректированный R2 на число членов в регрессионном уравнении;
- ст. Ош. – стандартная ошибка, мера рассеяния наблюдаемых значений относительно линии регрессии, а также оценки качества параметров;
- t – критерий Стьюдента, используется для оценки статистической значимости параметров уравнения;
- F – критерий Фишера используется для проверки значимости регрессионной модели и значимости эффектов;
- p – уровень значимости представляет собой вероятность ошибки, что связь между переменными является лишь случайной особенностью данной выборки;
- сс – число степеней свободы для соответствующего эффекта.

Оценка значимости изменения n_p , $p = 0,597$ не отвечает заданному уровню значимости $p = 0,05$. Такой же вывод следует из сравнения величины $t = \sqrt{F} = \sqrt{0,2823} = 0,531$ и соответствующего табличного $t_{табл} = 12,7$ (табл. 3).

Таким образом, влияние колебания частоты вращения на угол впрыскивания незначимо и дальнейший анализ следует проводить для одного фактора нагрузочной x

а Аналогичные результаты получены и для других параметров топливоподачи $p_{ф.к}$ и p_n – давления в топливном канале форсунки и давления топлива в штуцере топливного насоса.

к В результате, ставилась задача получить статистические параметры взаимосвязи следующих характеристик впрыскивания топлива при работе системы топливоподачи по нагрузочной характеристике в условиях динамических испытаний:

- р** – угла впрыскивания $\varphi_{вп}$ (m_p);
- и** – давления топлива в штуцере топливного насоса $p_n(m_p)$;
- с** – давления в топливном канале форсунки $p_{ф.к}(m_p)$.

Предварительная визуальная оценка наблюдаемых значений p_n в зависимости от m_p выявила явную нелинейность. Это послужило основанием для применения к описанию статистических связей однофакторной модели второго порядка в форме регрессионного уравнения $p_n = f(m_p, m_p^2)$.

Используя пакет STATISTICA, получена однофакторная модель второго порядка:

$$p_n = 12,454 + 30,272m_p - 0,47403m_p^2.$$

Статистические параметры данного регрессионного уравнения приведены в таблицах:

- одномерные критерии значимости табл. 4;
- оценки параметров табл.5;
- 'SS модели и SS остатков', характеризующую модель в целом табл. 6.

Таблица 4 – Критерии значимости

Одномерные критерии значимости для p_n					
Эффект	SS	Степени свободы	MS	F	p
Св.член	425,0	1	425,0	4,097	0,047655
m_p	104825,3	1	104825,3	1010,448	0,0
m_p^2	23519,2	1	23519,2	226,710	0,0
Ошиб.	5913,3	57	103,7	-	-

Таблица 5 – Оценка параметров

Эффект	p_n Парам.	p_n Ст.Ош.	p_n t	p_n p	p_n Ст.Ош.2
Св.член	12,454	6,15327	2,0241	0,047655	-
m_p	30,272	0,95234	31,7875	0,0	0,057681
m_p^2	-0,474	0,03148	-15,0569	0,0	0,057681

Таблица 6 – характеризующую модель

SS модели и SS остатков для p_n											
Зависим. Перемен.	Мно-жеств. R	Мно-жест. R2	Скоррек. R2	SS модели	сс модели	MS модели	SS остатка	сс остатка	MS остатка	F	p
p_n , бар	0,9964	0,9928	0,9925	810051	2	405025	5913,25	57	103,741	3904,2	0,0

Полученные модели соответствуют критериям Фишера $F_{\text{табл}} > F_{\text{факт}}$. Критическое значение критерия Фишера, определенное по таблице для интервала степеней свободы 50–60, находится в диапазоне 3,15–3,18. Поскольку критерий Фишера модели значительно больше $F_{\text{крит}}$ уравнение можно считать значимым, табл. 6.

Оценка точности модели осуществляется по величине коэффициента детерминации R^2 (скорректированного). Величина $R^2 = 0,99$ (табл. 6) означает, что 99 % общей дисперсии экспериментальных значений объясняется регрессионной зависимостью и порядка 1 %, что приходится на неучтенные факторы, в том числе и на вариации числа оборотов.

Значимость параметров оценивается с помощью критерия Стьюдента (t – статистики). Этот параметр приведен в табл. 5. Критическое значение t находится для данного числа наблюдений, числа независимых переменных и уровня значимости $t_{\text{табл}}(n-m-1, p)$, где $n_p = 60$ число наблюдений (объем выборки), $m_p = 2$ число объясняющих переменных, $p = 0,05$. Найденное критическое значение находится в диапазоне $2,00 < t_{\text{крит}} < 2,02$. Поскольку любой из t – критериев в таблице оценки параметров превышает $t_{\text{крит}}$, то это означает, что статистическая значимость коэффициентов подтверждается.

Ниже приведены два графика, иллюстрирующие качество анализируемой модели (рис. 3, 4).

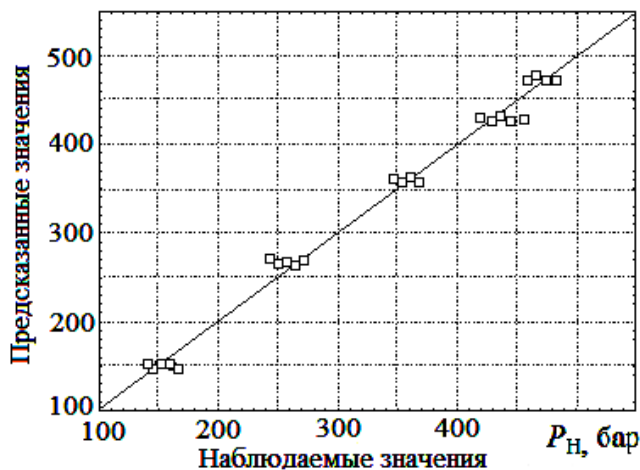


Рисунок 3 – Положение наблюдаемых значений относительно линии равных величин p_n для нагрузочной характеристики:
□ – наблюдаемые значения

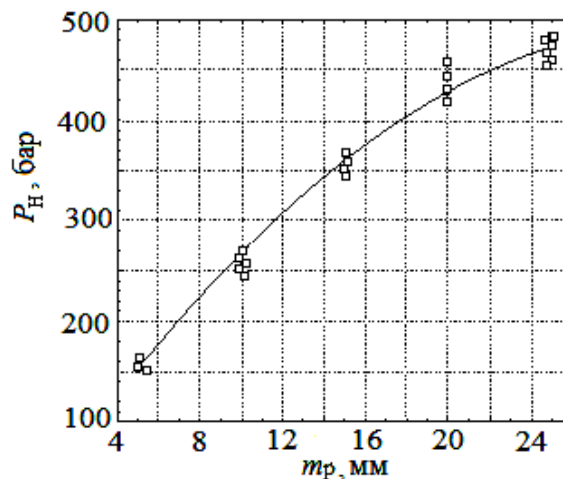


Рисунок 4 – График предсказанных значений p_n в зависимости от положения рейки ТНВД и наблюдаемые величины p_n :
□ – наблюдаемые значения

График рис. 3 показывает, что предсказанные значения и наблюдаемые достаточно тесно группируются вокруг линии равных значений, что подтверждает хорошую аппроксимацию опытных данных.

Зависимость предсказанных значений давления топлива в штуцере топливного насоса p_n от выхода рейки ТНВД m_p рис. 4, совместно с экспериментальными данными (квадратные точки на графиках) обозначены конкретные значения наблюдений.

Следующей задачей в обработке опытных данных было построение и анализ модели $p_{ф.к} = f(m_p, m_p^2)$.

Однофакторное регрессионное уравнение второго порядка, созданное пакетом STATISTICA, имеет вид:

$$p_{ф.к} = 124,69 + 24,354m_p - 0,4326m_p^2.$$

Численные значения основных статистик уравнения, приведенные в объединённой табл. 7, 8, 9, созданные пакетом STATISTICA в процессе анализа:

Таблица 7– Численные значения основных статистик уравнения

Одномерные критерии значимости для $p_{ф.к}$					
Эффект	SS	Степени свободы	MS	F	p
Св.член	42602,34	1	42602,34	389,59	0,0
m	67845,51	1	67845,51	620,43	0,0
m^2	19588,27	1	19588,27	179,13	0,0
Ошиб.	6233,05	57	109,35	-	-

Таблица 8 – Численные значения основных статистик уравнения

Оценки параметров						
Эффект	$p_{ф.к}$ Парам.	$p_{ф.к}$ Ст.Ош.	$p_{ф.к}$ t	$p_{ф.к}$ p	$p_{ф.к}$ Бета (?)	$p_{ф.к}$ Ст.Ош.2
Св.член	124,69	6,3175	19,738	0,0	-	-
m_p	24,35	0,9778	24,909	0,0	2,04846	0,082239
m_p^2	-0,43	0,0323	-13,384	0,0	-1,10069	0,082239

Таблиця 9 – Численные значения основных статистик уравнения

SS модели и SS остатков для $p_{ф.к}$											
Зависим. Перемен.	Множест. R	Множест. R2	Скоррект R2	SS модель	сс модель	MS модель	SS остаток	сс остаток	MS остаток	F	p
$p_{ф.к}$	0,9926	0,9853	0,98475	416876,2	2	208438,1	6233,1	57	109,4	1906,1	0,0

Графическое представление полученных характеристик дано на рис. 5, 6.

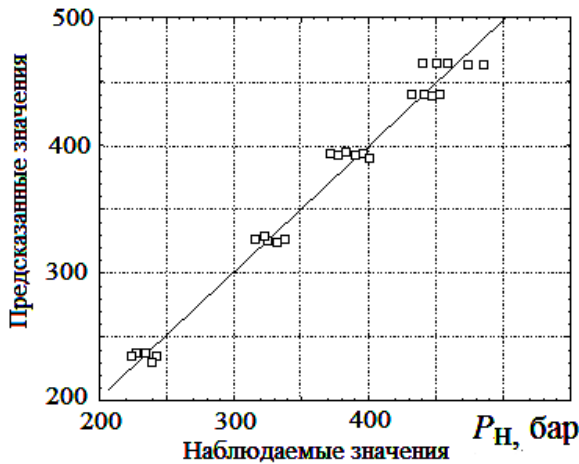


Рисунок 5 – Положение наблюдаемых значений относительно линии равных величин $p_{ф.к}$ для нагрузочной характеристики:
□ – наблюдаемые значения $p_{ф.к}$

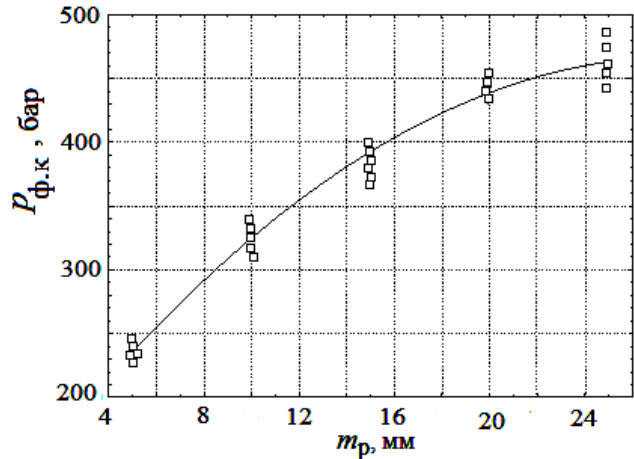


Рисунок 6 – График предсказанных значений $p_{ф.к}$ в зависимости от положения рейки ТНВД и наблюдаемые величины $p_{ф.к}$:
□ – наблюдаемые значения $p_{ф.к}$

Все статистики, характеризующие значимость уравнения и его коэффициентов, удовлетворяют критическим значениям F – критерия и t – статистики. Следовательно, модель давления топлива в форсунке и её параметры значимы.

Для описания статистической связи угла впрыскивания $\phi_{вп}$ и положения рейки ТНВД оказалось достаточно однофакторной линейной модели вида:

$$\phi$$

Графическое представление полученного регрессионного уравнения приведено на рис. 7, 8. В обоих вариантах визуальная оценка свидетельствует о хорошей сходимости наблюдаемых и предсказанных значений $\phi_{вп}$.

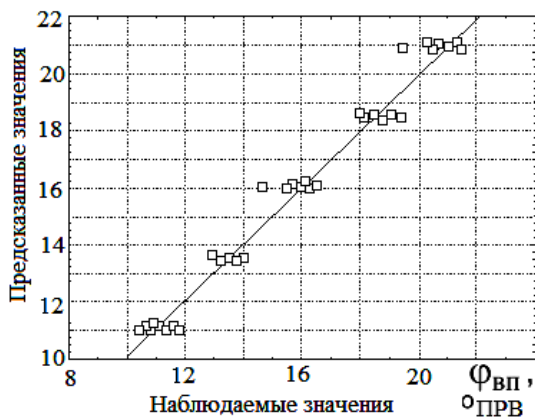


Рисунок 7 – Положение наблюдаемых значений $\phi_{вп}$ относительно линии равных величин $\phi_{вп}$ для нагрузочной характеристики:
□ – наблюдаемые значения $\phi_{вп}$

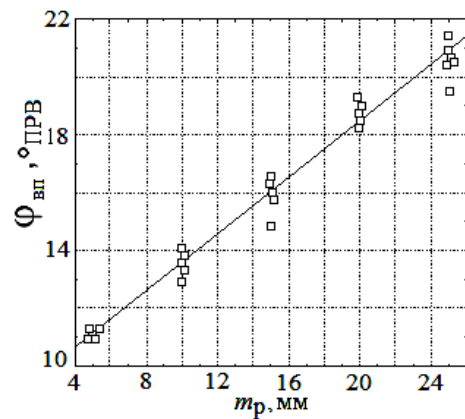


Рисунок 8 – График предсказанных значений $\phi_{вп}$ в зависимости от положения рейки ТНВД и наблюдаемые величины $\phi_{вп}$:
□ – наблюдаемые значения $\phi_{вп}$

Значимость уравнения обосновывается высоким значением критерия Фишера, составляющего $F = 411588$, а для его параметров величинами t – критерия Стьюдента 70,25 и 64,48. Ещё более высокие показатели имеют прогностические качества модели. Действительно, коэффициенты корреляции и детерминации близки к значениям 0,99.

Зависимость основных параметров процесса впрыскивания топлива от частоты вращения распределительного вала (по скоростной характеристике) исследована по экспериментальным данным [2], полученным при динамических испытаниях.

Графическое представление хода эксперимента отображено на графиках рис. 9.

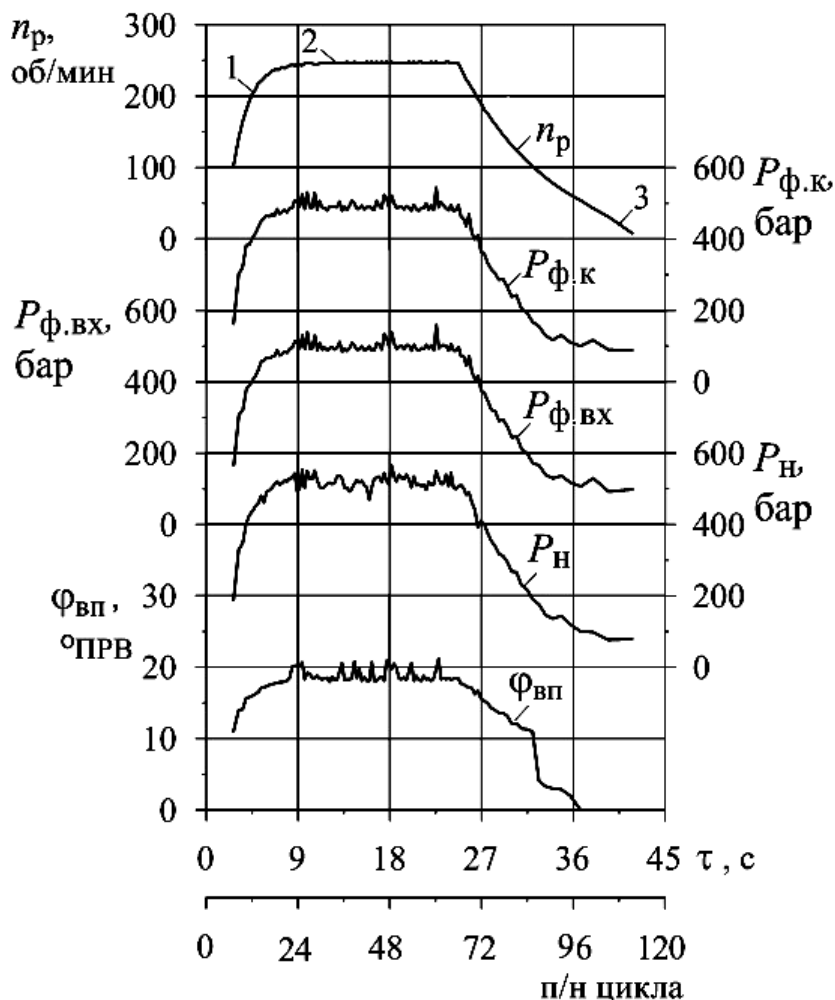


Рисунок 9 – Параметры топливоподачи на режимах скоростной характеристики при динамических испытаниях:

1 – участок разгона; 2 – участок установившегося режима; 3 – участок выбега

Графики на рис. 9 построены в зависимости от времени и соответствующих номеров циклов. На кривой n_p можно выделить три участка: разгона ТНВД 1, установившегося режима 2 и выбега 3. Последний участок соответствует свободному вращению распределительного вала после выключения двигателя стенда. Положение рейки ТНВД оставалось неизменным $m_p=15$ мм.

Ставилась задача создать и проанализировать следующие три модели:

– зависимость угла впрыска от скорости вращения распределительного вала $\varphi_{вп}=f(n_p)$;

– зависимость давления в штуцере топливного насоса от скорости вращения распределительного вала $p_n=f(n_p)$;

– зависимость давления в топливном канале форсунки от скорости вращения распределительного вала $p_{ф.к}=f(n_p)$.

Для анализа были выделены два участка: режимы разгона и выбега, объединённые в одной табл. 10.

Таблица 10 – Объединённые данные режимов разгона и выбега

№	n_p , об/мин	$p_{ф.к.}$, бар	p_n , бар	$\Phi_{вп.}$, град	№	n_p , об/мин	$p_{ф.к.}$, бар	p_n , бар	$\Phi_{вп.}$, град	№	n_p , об/мин	$p_{ф.к.}$, бар	p_n , бар	$\Phi_{вп.}$, град
1	102	163	188	10,8	15	180	383	403	15,7	28	225	458	462	17,2
2	102	168	191	11	16	181	359	401	15,3	29	229	466	491	17,3
3	109	194	218	11,3	17	190	365	411	15,6	30	231	463	496	17,6
4	117	204	230	11,4	18	193	385	426	15,8	31	231	457	502	17,5
5	124	243	267	12,1	19	196	411	391	16,7	32	235	470	502	17,6
6	131	238	268	12,1	20	204	403	437	16	33	237	464	512	17,7
7	139	267	296	13,2	21	205	399	442	16,2	34	237	485	521	17,8
8	140	302	329	13,2	22	209	417	452	16,3	35	237	471	511	17,9
9	146	289	312	13,6	23	211	416	462	17,1	36	239	481	523	17,7
10	154	285	318	13,6	24	218	434	461	16,5	37	239	464	511	18
11	161	305	340	14	25	218	469	489	17,2	38	241	476	515	18,1
12	164	321	347	14,1	26	221	450	480	17,1	39	241	475	521	17,9
13	168	315	354	14,3	27	223	436	483	17,3	40	243	487	529	18,5
14	176	333	376	14,9										

Начало и конец выборки данных на минимальных оборотах ограничен величиной около 100 об/мин из-за неоднозначности определения угла впрыскивания при меньших оборотах с дробным впрыскиванием.

Процесс построения модели произведен по методике, состоящей из следующих этапов:

- предварительная спецификация модели;
- построение модели с использованием программы STATISTICA;
- анализ и оценка полученной модели;
- оценка составляющих модели.

Спецификация модели угла впрыскивания построена для двух участков разгона и выбега и отражена на корреляционной диаграмме рис. 10.

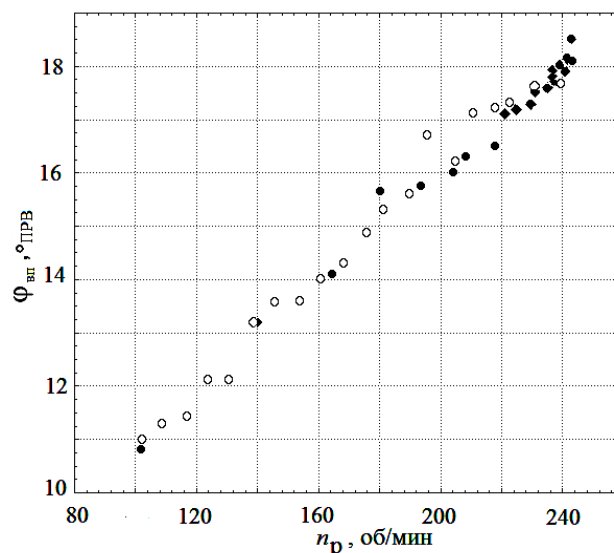


Рисунок 10 – Диаграмма зависимости $\Phi_{вп}$ от n_p для участков разгона и выбега:

○ – значения разгона; ● – значения выбега

Несмотря на то, что на временной диаграмме (зависимости изменения угла впрыскивания во времени) видна определенная нелинейность, зависимость угла впрыскивания от скорости проявляет явно линейный характер и также видно, что значения

углов впрыскивания обоих участков ложатся на одну линию, что хорошо прослеживается на рис. 10. Таким образом, можно предположить, что модель для анализа определяется как одно единое уравнение простой однофакторной регрессии.

Построение модели производилось с учетом использования пакета STATISTICA. Модель представлена следующим уравнением простой регрессии первого порядка:

$$\varphi_{\text{вп}} = 5,84418 + 0,050926m_p$$

Характеристика модели $\varphi_{\text{вп}}$ уравнения регрессии оценивается путем использования критерия Фишера F. Предварительно выполнен дисперсионный анализ для модели в целом, определён критерий Фишера, который затем сравнили его с табличным значением. Для наглядности результаты сведены в табл. 11 дисперсионного анализа (с данными из таблицы 'SS модели и SS остатков').

Таблица 11 – Дисперсионный анализ

<i>Источники вариации</i>	<i>Число степеней свободы сс</i>	<i>Сумма квадратов отклонений SS</i>	<i>Дисперсия на степень свободы MS</i>	<i>F отношение фактическое</i>	<i>F отношение табличное при p = 0,05</i>
Общая	40	206,16	-	-	-
Объясненная	1	203,14	203,14	2558,4	4,08
Остаточная (ошибки)	38	3,0172	0,0794	1	-

Критерий Коэффициент Фишера (F – фактическое), определяемый в данном случае как отношение 'объясненной' дисперсии (203,14) к дисперсии ошибки (0,0794) и характеризующий насколько модель хорошо объясняет общую дисперсию данных, значительно превышает табличное значение. Это означает, что модель статистически значима.

Прогностические свойства модели характеризуется величиной скорректированного R². Его значение превышает 0,98, что является хорошим показателем и свидетельством того, что полученная модель 'объясняет' более 98 % дисперсии зависимой переменной.

Оценка значимости составляющих модели $\varphi_{\text{вп}}$ производится путем сравнения рассчитанного t – критерия с табличным. Оцениванию подлежат коэффициент регрессии и свободный член. Оценивание осуществлено стандартным методом, т.е. рассчитывается, ошибка соответствующего параметра и затем было, определено значение t – критерия как отношение значения параметра к его ошибке: $t_a = a/m_a$, $t_b = b/m_b$. Здесь t_a , t_b расчетные значения t – статистик для свободного члена и коэффициента регрессии, b – коэффициент регрессии, a – свободный член.

Значение t – критерия табличное для числа степеней свободы 38 и уровня значимости 0,05 одинаково для всех параметров и равно $t_{\text{табл}} = 2,0244$.

Результаты оценок сведены в табл. 12.

Таблица 12 – Результаты оценок

<i>Параметр</i>	<i>Ошибка</i>	<i>t – критерий рассч.</i>	<i>t – критерий табл.</i>
коэф. регрессии	0,0010	50,581	2,0244
своб. член	0,1975	29,580	
R (коэф. корреляции)	0,0197	4,93	

Все рассчитанные (фактические) выше t – критерии t_a , t_b значительно больше критического табличного значения. Это означает, что все параметры уравнения регрессии являются статистически значимыми.

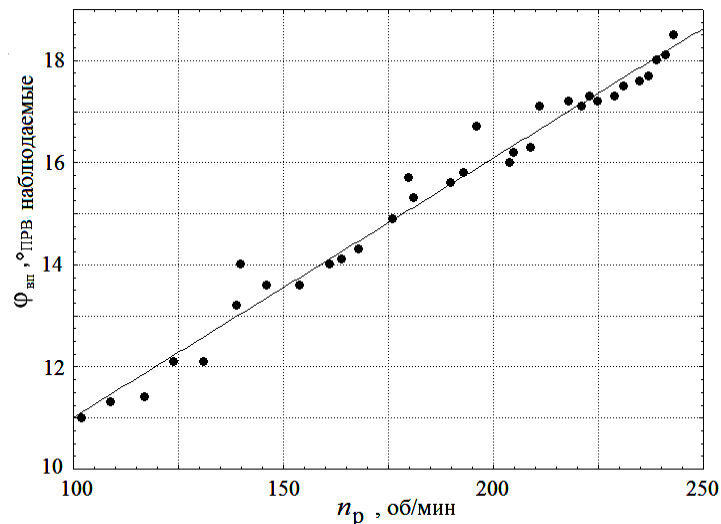


Рисунок 11 – Общий график линии регрессии и наблюдаемых значений зависимости $\varphi_{вп}$ от n_p .

На рис. 11 показаны совместные графики уравнения регрессии с наблюдаемыми данными участков разгона и выбега.

Анализ и моделирование зависимости давления топлива в штуцере топливного насоса $p_n = f(n_p)$ и давления в топливном канале форсунки $p_{ф.к} = f(n_p)$ был произведен по тому же алгоритму, что и моделирование зависимости угла впрыска.

В результате работы пакета STATISTICA были созданы уравнения математических моделей.

Уравнение регрессии для зависимости давления топлива в штуцере топливного насоса от частоты вращения распредвала получено в виде

$$p_n = - 25,853 + 2,2756n_p.$$

Аналогично для давления топлива в канале форсунки от числа оборотов:

$$p_{ф.к} = - 40,332 + 2,1818n_p.$$

Характеристика модели по оценке значимости уравнения модели производится по критерию Фишера, т.е. сравнением фактического значения с табличным для заданного уровня значимости. Для удобства сравнения рассчитанные значения F обеих моделей помещены в табл. 13.

Таблица 13 – значения F обеих моделей

Модель	F фактический	F табл. при $p=0,05$
p_n	2927,1	4,08
$p_{ф.к}$	2100,8	

Коэффициент Фишера (F – фактическое) для моделей значительно превышает табличное значение. Это означает, что модели статистически значимы. Точностная характеристика модели (или адекватность) характеризуется значением скорректированного R^2 . Для обеих моделей он равен примерно 0,98, – это хорошее значение, говорящее о том, что полученные уравнения моделей 'объясняют' примерно 98% дисперсии зависимой переменной.

Значимость каждого параметра уравнения регрессии в отдельности осуществляется на основе t – статистик. Оцениванию подлежат коэффициент регрессии и свободный член.

Значение t – критерия табличное для числа степеней свободы 38 и уровня значимости 0,05 одинаково для всех параметров и равно $t_{табл} = 2,0244$.

Результаты оценок по каждой модели для сравнения сведены в единую табл. 14.

Таблиця 14 – Результати оценок

Параметр	Ошибка	t-критерий расщ.	t-критерий табл.
коэф. регрессии p_n	0,0420	54,103	2,0244
своб. член p_n	8,2537	- 3,1323	
коэф. регрессии $p_{ф.к}$	0,0476	45,834	
своб. член $p_{ф.к}$	9,3409	- 4,3178	

Все рассчитанные (фактические) t – критерии больше критического табличного значения, что означает, что все параметры уравнения регрессии являются статистически значимыми.

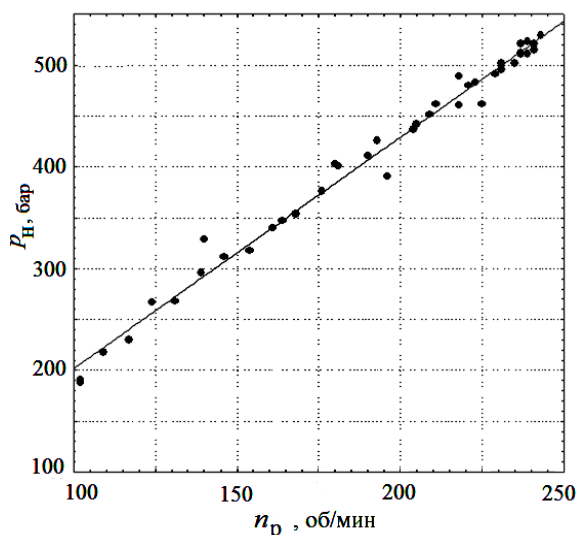


Рисунок 12 – Общий график линии регрессии и наблюдаемых значений p_n от n_p .

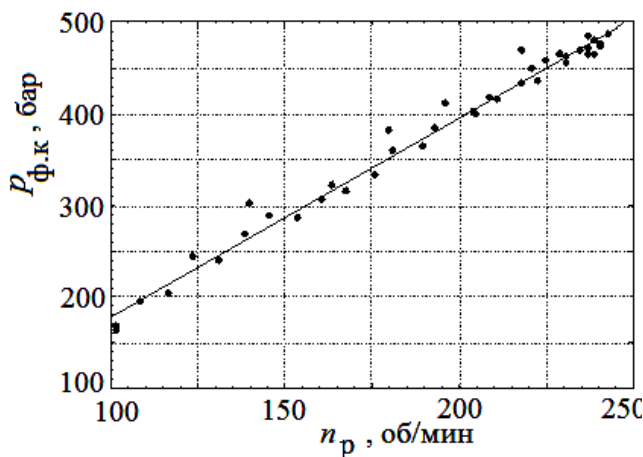


Рисунок 13 – Общий график линии регрессии и наблюдаемых значений $p_{ф.к}$ от n_p .

На рис. 12, 13 для наглядности показаны совместные графики уравнения регрессии, с наблюдаемыми данными участков разгона и выбега давления в насосе и форсунке соответственно.

Выводы. Предложены статистические модели параметров топливоподачи судового среднеоборотного дизеля по данным динамических безмоторных испытаний на режимах нагрузочной и скоростной характеристик.

Модели построены с использованием программного пакета СТАТИСТИКА, обеспечивающего широкие возможности варьирования способов и режимов обработки экспериментального материала. В качестве базового статистического метода использован регрессионный анализ.

Для нагрузочной характеристики в качестве моделей давления топлива использованы однофакторные регрессионные уравнения второго порядка, а для угла впрыскивания – первого порядка.

Изменение параметров по скоростной характеристике описано регрессионными уравнениями первого прядка.

Результаты моделирования в сочетании с дополнительным анализом и сравнением F – критериев и t – критериев полученных параметров с табличными значениями позволяют сделать вывод о статистической значимости всех трех моделей $\varphi_{вп}=f(n_p)$, $p_n=f(n_p)$, $p_{ф.к}=f(n_p)$ и пригодности их для дальнейшего использования в оценке гидродинамических процессов в системе впрыскивания топлива в судовом дизеле.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Половинка Э. М., Слободянюк Н. В. Нагрузочная характеристика системы впрыскивания топлива судового среднеоборотного дизеля в условиях динамических испытаний. *Technology audit and production reserves*. 2018. № 6/1 (44). С. 41–49.
2. Половинка Э. М., Слободянюк Н. В. Скоростные характеристики системы топливоподачи судового среднеоборотного дизеля на переменных режимах. *Молодой вчений*. 2016. № 3 (43). С. 735–740.
3. Патрахальцев Н. Н., Пономарёв М. Н., Савастенко А. А. Влияние переходных процессов в топливной аппаратуре дизеля на его динамические качества. *Вестник РУДН. Инженерные исследования*. 2003. №1. С. 15–18.
4. Патрахальцев Н. Н. Влияние переходных процессов в топливной аппаратуре на динамические свойства дизеля. *Известия ВУЗов*. Москва : Машиностроение, 1987. № 4. С. 65–80.
5. Леонов О. Б., Патрахальцев Н. Н. Построение характеристики переходного процесса с учётом особенности топливоподачи при неустановившемся режиме дизеля. *Известия ВУЗов*. Москва : Машиностроение, 1971. № 7. С. 35–39.
6. Газале А., Камышников О. В., Патрахальцев Н. Н. Влияние переходных процессов в топливной аппаратуре дизеля ЯМЭ-238 на эффективность операции разгона. *Известия ВУЗов*. Москва : Машиностроение, 1985. № 10. С. 85–89.
7. Овчаренко С. М., Корнеев П. С., Четвергов В. А. Влияние переходных процессов на расход топлива дизелем в эксплуатации. *Известия Транссиба*. 2012. № 1 (9). С. 27–32.
8. Хомич А. З., Тупицын О. И., Симсон А. Э. Экономия топлива и теплотехническая модернизация локомотивов. Москва : Транспорт, 1975. 264 с.
9. Коссов Е. Е., Сухопаров С. И. Оптимизация режимов работы тепловозных дизель-генераторов. Москва : Интекст. 1999. 184 с.
10. Стенд для дослідження і регулювання паливної апаратури дизелів, патент u201805581. *Сайт Державного підприємства Український інститут інтелектуальної власності (УКРПАТЕНТ)*. URL : <http://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=255858>.

REFERENCES

1. Polovinka, E. M. (2018). The load characteristic of the fuel injection system of a marine medium-speed diesel engine under dynamic testing, *Technology audit and production reserves*, 6/1 (44), 41–49.
2. Polovinka, E. M. (2016). High-speed characteristics of the fuel supply system of a marine medium-speed diesel engine in variable modes, *Molodiy vcheniy*, 3 (43), 735–740.
3. Patrahaltsev, N.N. (2003). The effect of transients in the fuel equipment of a diesel engine on its dynamic qualities, *Bulletin of RUDN University, ser. Engineering research*, 1, 15–18.
4. Patrahaltsev, H.N. (1987). The effect of transients in fuel equipment on the dynamic properties of a diesel engine, *News of Universities. – Engineering*, 4, 65–70.
5. Leonov, O.B. (1971). The construction of the characteristics of the transient process, taking into account the peculiarities of fuel supply in an unsteady diesel mode, *Proceedings of universities. – Engineering*, 7, 35–39.
6. Gazale, A. (1985). Influence of transients in the fuel equipment of the YaME-238 diesel engine on the efficiency of the acceleration operation, *Proceedings of universities. Engineering*, 10, 85–89.

7. Ovcharenko S. M. (2012). The effect of transients on diesel fuel consumption in operation, *News of the Trans-Siberian Railway, I* (9), 27–32.

8. Khomich A. Z., Tupitsyn O. I., Simson A. E. (1975). *Fuel economy and heat engineering modernization of locomotives*. Moskva : Transport.

9. Kossov E. E., Sukhoparov E. E. (1999). Optimization of operating modes of diesel generators. Moskva : Intext.

10. The site of the State Power Company Ukrainian Institute of Intellectual Power (UKRPATENT), the name of the model: *Stand for additional and regular heating equipment, number u201805581*. Retrived from <http://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=255858>.

Половинка Е. М., Слободянюк М. В. СТАТИСТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМИ ВПОРСКУВАННЯ ПАЛИВА СУДНОВОГО СЕРЕДНЬООБЕРТОВОГО ДИЗЕЛЯ

Гідродинамічні процеси в системі впорскування палива в дизельних двигунах викликає наукових інтерес дослідження, що зумовлено формуванням економічних параметрів роботи дизелів в цілому.

На кафедрі суднових енергетичних установок Національного університету “Одеська морська академія” виконано експериментальне дослідження процесу подачі палива дизельної паливної апаратури на несталі і часткових режимах. Експериментальне дослідження проводилося на безмоторному стенді, обладнаному програмно-апаратним комплексом “тензостанція” і програмно-апаратним електромеханічним комплексом управління становищем рейки паливного насоса високого тиску, що дало можливість отримати експериментальні значення гідродинамічних процесів в паливній апаратурі суднового середньообертового дизеля в динамічному режимі.

Об’єктом дослідження є гідродинамічні процеси в паливній системі високого тиску при роботі по швидкісній і навантажувальній характеристикам. Предметом дослідження є взаємозв’язок параметрів подачі палива з режимними і регульовальними факторами, а також аналіз статистичних параметрів отриманих регресійних моделей.

В роботі представлені результати моделювання характеристик системи подачі палива суднового середньообертового дизеля в формі статистичних залежностей основних показників впорскування від регульовальних і експлуатаційних параметрів, так як дана форма є оптимальною для складання аналітичних моделей з оформленням результатів у формі регресійних залежностей.

Сформовані регресивні моделі відображають взаємозв’язок параметрів процесу впорскування для швидкісної і навантажувальній характеристиці суднового середньообертового дизеля.

Проведене дослідження показало статистичну значущість представлених моделей (кута вприскування, тиску палива в штуцері паливного насоса, тиску в паливному каналі форсунки від частоти обертання розподільного валу) та їх придатність в оцінці швидкісній і навантажувальній характеристики суднового середньообертового дизеля.

Ключові слова: *середньообертовий дизель, паливна апаратура, змінні режими, навантажувальна характеристика, швидкісна характеристика, динамічні випробування, статистичні моделі.*

Polovinka E., Slobodianiuk N. STATISTICAL MODELING OF CHARACTERISTICS OF THE FUEL INJECTION SYSTEM OF SHIP MIDDLE-TURNING DIESEL

The hydrodynamic processes in the fuel injection system in diesel engines arouse scientific interest in research, which is due to the formation of economic parameters of diesel engines as a whole.

At the Department of Ship Power Plants of the National University of Odessa Maritime Academy, an experimental study of the process of fuel supply of diesel fuel equipment in transient and partial modes. The experimental study was carried out on a non-motorized test bench equipped with a “strain gauge” hardware-software complex and an electromechanical hardware-software complex for controlling the position of the rail of a high-pressure fuel pump, which made it possible to obtain experimental values of hydrodynamic processes in the fuel equipment of a marine medium-speed diesel engine in dynamic mode.

The object of the study is the hydrodynamic processes in a high-pressure fuel system when operating according to speed and load characteristics. The subject of the study is the relationship of fuel supply parameters with operating and regulatory factors, as well as the analysis of statistical parameters of the obtained regression models

The paper presents the results of modeling the characteristics of the fuel supply system of a marine medium-speed diesel engine in the form of statistical dependences of the main injection indicators on the adjustment

and operational parameters, since this form is optimal for compiling analytical models with the presentation of the results in the form of regression dependencies.

The generated regression models reflect the relationship between the parameters of the injection process for the speed and load characteristics of a medium-speed marine diesel engine.

The study showed the statistical significance of the presented models (injection angle, fuel pressure in the fuel pump fitting, pressure in the fuel channel of the nozzle versus the camshaft speed) and their suitability in assessing the speed and load characteristics of a medium-speed marine diesel engine.

Keywords: *medium-speed diesel engine, fuel equipment, variable modes, load characteristic, speed characteristic, dynamic tests, statistical models.*

© Половинка Е. М., Слободянюк М. В.

Статтю прийнято
до редакції 21.04.20

РОЗРАХУНОК ЕФЕКТИВНОЇ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ПОРИСТОГО ТІЛА ДЛЯ УМОВ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО НАГРІВАННЯ

Степанов О. В., к.т.н., доцент КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, e-mail: ostepanoff@iff.kpi.ua, ORCID: 0000-0002-6601-6852;

Романенко Ю. М., провідний інженер КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, e-mail: romanenko.yuri@ill.kpi.ua, ORCID: 0000-0003-3877-8646;

Лобода П. І., д.т.н., професор КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, e-mail: decap@iff.kpi.ua, ORCID: 000-0003-2012-1080;

Андрієнко Ю. Є., студентка КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, e-mail: youandrienko@gmail.com;

Богомол Ю. І., д.т.н., доцент КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, e-mail: ubohomol@iff.kpi.ua, ORCID: 0000-0001-6633-0078

Метою дослідження є аналіз поля температурного градієнту, засобами математичного моделювання для визначення ефективної теплопровідності пористих заготовок з порошку молібдену в умовах електронно-променевого нагріву.

Проаналізовано вклад різних механізмів перенесення тепла в умовах електронно-променевого нагрівання пористих заготовок. У результаті дослідження було отримано коефіцієнти лінійної залежності відносної теплопровідності пористого тіла від пористості. Доведено, що за умов швидкісного нагріву у вакуумі при розмірі пор до 25 мкм, визначальну роль відіграє кондуктивна теплопровідність, вплив інших механізмів можна не враховувати. Показано, що кондуктивна і сумарна теплопровідність пористого тіла може бути розрахована з деяким рівнем невизначеності, який зростає з ростом пористості виробу.

Запропоновано проводити розрахунки значення питомої теплопровідності пористого тіла шляхом комп'ютерного моделювання з застосуванням методу скінчених елементів. Даний підхід дозволяє кількісно і якісно оцінити теплофізичні параметри процесу спікання високоенергетичними джерелами нагріву з урахуванням пористості порошкових тіл.

Стаття містить детальний аналіз теплових ефектів, які притаманні процесу спікання, з побудовою математичних моделей теплопередачі в пористому середовищі. Результати дослідження можуть бути використані при розробці технології електронно-променевого спікання різних порошкових матеріалів, термообробці, оптимізації вже існуючих процесів.

Ключові слова: математичне моделювання; теплопровідність; пористість; спікання; поле температурного градієнту; електронно-променевий нагрів.

DOI: 10.33815/2313-4763.2020.2.23.108–117

Постановка задачі. Формування і контроль температурного поля в неоднорідному середовищі є досить непростим завданням. З подібною задачею зустрічаються при використанні порошкових та пористих каталізаторів, при реалізації технологічних прийомів селективного лазерного чи електронно-променевого спікання, в теплообмінниках, тощо. Серед ключових моментів контролю температурного поля є визначення ефективних коефіцієнтів теплопровідності пористого середовища, а також їх залежність від пористості та температури. Визначенню показників ефективної теплопровідності для різних практичних застосувань, від характеристики вогнетривів до температурного режиму порошкових каталізаторів та впливу концентрованих джерел енергії на ущільнені порошкові шари в *powder bed* адитивних технологіях присвячено десятки робіт теоретичного та експериментального характеру за більш ніж 60 років [1, 2, 3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В роботі [4] виділено та докладно проаналізовано чотири основних механізми передачі тепла в пористій структурі яка складається з набору довільно розташованих сфер, у тому числі під дією деякого ущільнюючого навантаження. Серед розглянутих механізмів: а) кондуктивна теплопровідність в об'ємі частинки; б) кондуктивна теплопровідність контакту між частинками; в) теплопровідність газової фази в пустотах; г) теплопровідність випромінюванням між поверхнями частинок.

В серії робіт Asakuma [5–7] досліджено окремі механізми перенесення тепла в пористому середовищі та одержано узагальнені гомогенізаційні залежності ефективної теплопровідності від розміру сфер, температури, тиску. В роботі [8] проаналізовано вплив механізму випромінювання на теплопровідність пористих середовищ з застосуванням різних моделей.

Основними недоліками проведених досліджень є їх направленість на специфічні системи: елементи досить великого розміру 10^{-3} - 10^{-2} м як для середовища *pebble-bed*, різні інтервали температур, які досягають лише 1500°C , порівняно високі значення тиску газу в пористому середовищі.

Метою роботи є розроблення підходу та визначення ефективної теплопровідності пористих заготовок з порошку Мо при спіканні в умовах електронно-променевого нагріву.

Постановка завдання. Додатковими характеристиками об'єктів є розмір часток порошку і характерний розмір пор порядку $1\text{--}5 \cdot 10^{-6}$ м та порівняно стабільні контакти між частками, оскільки спресована заготовка підлягала попередньому спіканню.

Для оцінки ефективної теплопровідності пористого тіла застосували дещо змінену формулу, запропоновану в [3], яка в нашому випадку має вигляд:

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{(Q_{\text{cond}} + Q_{\text{gas}} + Q_{\text{rad}}) \cdot h}{S \cdot \Delta T}, \quad (1)$$

де λ_{eff} – ефективна теплопровідність (Вт / м · К); Q_{cond} , Q_{gas} , Q_{rad} – теплові потоки, що здійснюються відповідно механізмами кондуктивним, через газову фазу в порах та випромінюванням через пори, Вт; h – відстань, на яку передається тепло, м; S – площа поперечного перетину домену, m^2 ; ΔT – різниця температур на протилежних боках домена, К.

Для розрахунку ефективної теплопровідності формулювали та розв'язували обернену задачу стаціонарної теплопровідності. Визначальним рівнянням теплопровідності є рівняння Фур'є, яке в стаціонарному одновимірному випадку при відсутності внутрішніх джерел тепла, має вигляд:

$$\lambda \frac{d^2 T}{dx^2} = 0.$$

Розв'язком прямої задачі теплопровідності є температурне поле в домені та розраховані на його основі теплові потоки, що визначаються за відомими значеннями температури на протилежних сторонах домену та характеристиками теплопровідності матеріалу домену. В оберненому формулюванні, яке є продовженням прямої задачі і використовується в даній роботі, пропонується за відомими значеннями температури на протилежних сторонах домену та відомим значенням питомої теплопровідності безпористого матеріалу, застосовуючи домен з геометрією пористої структури, обчислювати ефективну питому теплопровідність пористого тіла. Подібні підходи до обчислення ефективних характеристик композиційних матеріалів описано в [9].

Для розв'язку прямої задачі теплопровідності використовували метод скінченних елементів. В якості середовища моделювання було обрано систему ANSYS Workbench 19R2 Academic edition. Оскільки пряма одночасна реалізація усіх трьох механізмів теплообміну викликає суттєві ускладнення, і робить задачу надто громіздкою, окремі механізми опрацьовували по чергово.

Обчислення кондуктивної теплопровідності. Кондуктивна теплопровідність, враховуючи дані робіт [1–5], переважає інші механізми за ефективністю. Для її оцінки, випадковим чином згенеровано близько 20 прикладів мікроструктур, які можуть виступати варіантами представницьких об'ємів пресовок. Представницькі об'єми формувались у вигляді двовимірних прямокутних доменів з лінійними розмірами сторін, що коливались

в межах 30–80 мкм. Пори в представницьких доменах генерувались різної форми: круглі, прямокутні, ромбовидні, трикутні та п'ятикутні без дотримання їх ізоляції одна від одної. Розмір пор задавали таким, щоб їх кількість в домені була не менше 20–30. Товщину (пасивний параметр) домену обирали рівним $\delta = 1$ мкм. Приклади модельних розрахункових доменів наведено на рис. 1. Для порівняння використовували розрахункові домени (реальні), одержані шляхом графічного оброблення зображень реальної пористої структури зразків, як показано на рисунку 2. Розміри реальних розрахункових доменів склали 30x30 мкм і мали товщину 1 мкм.

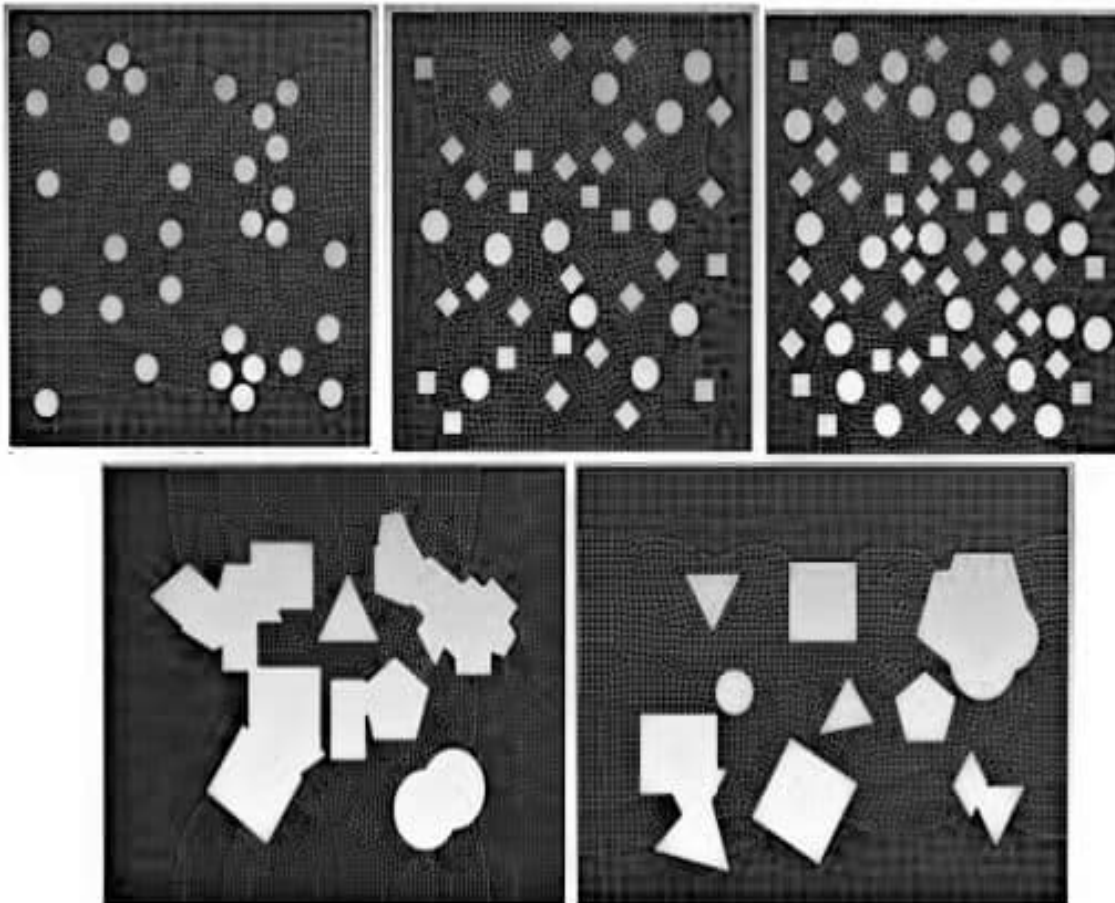


Рисунок 1 – Приклади модельних розрахункових доменів з обчисленим полем температур

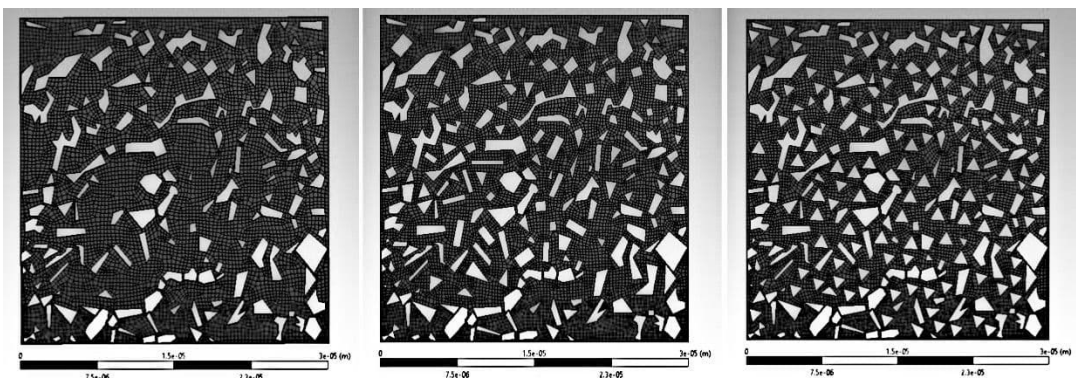


Рисунок 2 – Реальні розрахункові домени з обчисленим полем температур

Для усіх розрахункових доменів розв'язували пряму задачу теплопровідності в двох взаємо перпендикулярних напрямках: вертикальному та горизонтальному, та з використанням різних градієнтів температури в межах від 1 до 100 $^{\circ}\text{C}/\text{мкм}$. Результатом

розв'язку прямої задачі є сумарний тепловий потік, який фіксувався на одній з поверхонь, з застосованими граничними умовами першого роду Q .

Теплопровідність домену для кожного випадку визначали, як результат оберненої задачі за формулою:

$$\lambda_i = \frac{Q_i \cdot l_i}{m_i \cdot \delta \cdot \Delta T_i},$$

де l, m – повздовжній та поперечний відносно напрямку перенесення тепла розміри домену відповідно, м; Q – сумарний тепловий потік через домен, Вт; ΔT – різниця температур на протилежних сторонах домена, °С; δ – товщина домена, $1 \cdot 10^{-6}$ м.

Для врахування того, що використовується двовимірна модель розрахункового домену, за обчисленими значеннями теплопровідності домену для взаємно перпендикулярних напрямів (λ_1, λ_2) знаходили ефективну кондуктивну теплопровідність:

$$\lambda_{eff}^c = \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_{ss}(T) \cdot (1 - \theta)}{3},$$

де $\lambda_{ss}(T)$ – значення питомої теплоємності безпористого матеріалу за температури T , яка є середньою для розрахункового домену, $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{°С}$; θ – пористість, відн. од.

Графік залежності відносної питомої кондуктивної теплопровідності $(\lambda_{eff}^c / \lambda_{ss})$ від пористості показано на рис. 3.

Як показано на графіку, розрахункові значення відносної питомої теплопровідності мають тим більший розкид, чим вище пористість розрахункового домену, що пов'язано з випадковим характером розташування пор в окремо взятій структурі. Це створює відповідний рівень невизначеності, який необхідно враховувати при використанні обчислених значень теплопровідності в реальних розрахунках.

Обчислення теплопровідності випромінюванням. Теплове випромінювання описується рівнянням Стефана-Больцмана, і у випадку теплопередачі між паралельними поверхнями може бути записане [10] як:

$$q = \varepsilon_n \cdot c_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (2)$$

де q – густина теплового потоку, $\text{Вт}/\text{м}^2$; c_0 – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, $c_0 = 5.67 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}^4$; T_1, T_2 – температури поверхонь, К; ε_n – нормалізована степінь чорноти в системі, що розраховується за значеннями степені чорноти протилежних поверхонь за формулою:

$$\varepsilon_n = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}.$$

Стосовно випадку, який розглядається в даній роботі значення степені чорноти ε_1 та ε_2 співпадають. Густина теплового потоку, обчислена за формулою (1) є максимально можливою для пари температур T_1 та T_2 . Якщо поверхні, між якими здійснюється теплоперенесення непаралельні чи криволінійні густина теплового потоку може зменшуватись [10].

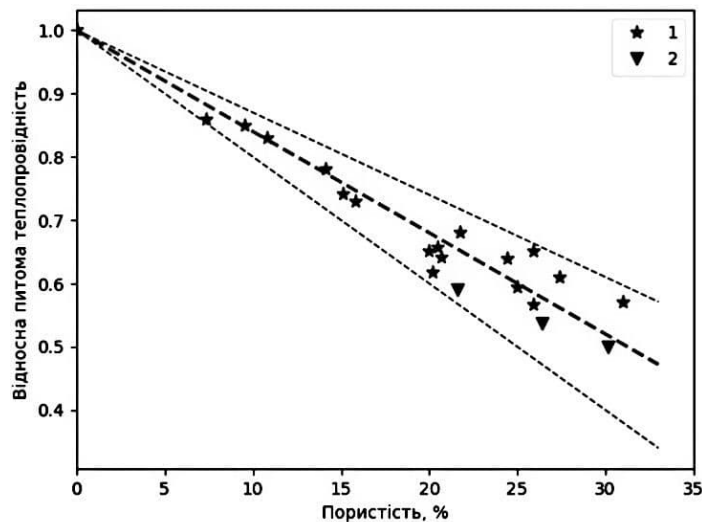


Рисунок 3 – Залежність відносної питомої теплопровідності від пористості зразку (1 – модельні домени, 2 – реальні домени)

З точки зору оцінки вкладу теплообміну випромінюванням в загальну ефективну теплопровідність пористого середовища необхідно оцінити її максимально можливі значення. На відміну від інших механізмів теплоперенесення, випромінювання суттєво залежить від температури. Для оцінки теплового потоку через окремо взятую пору з застосуванням додаткових моделей, обмежились наступними змінними моделі:

- розмір пор моделі складає від 2 до 25 мкм, що відповідає і дещо перевищує розмірам реальних пор в дослідних зразках і корелює з розміром часток порошку, з якого зразки виготовлено;

- значення градієнта температур від 50 до 1000 К/мм – відповідає і дещо перевищує значенням градієнта температури, обчисленим за додатковою моделлю нестационарного нагрівання зразків електронним променем з потужністю до 10^7 Вт/м² та пористістю зразків від 20 до 45 %;

- степінь чорноти матеріалу в межах 0.6 – 1.0, що відповідає реалістичним значенням для поверхні порошку молібдену;

- максимальна температура 2650 °С – близька до температури плавлення молібдену – максимальне значення температури, для якого доцільно проводити відповідні розрахунки.

Повний тепловий потік визначали за формулою (2) та з застосуванням скінченноелементної моделі, умовно показаної на рис. 4, яка забезпечує розрахунок теплового потоку виключно випромінюванням.

Результати обчислень дозволяють стверджувати, що значення теплового потоку випромінювання між двома поверхнями на відстані s (рис. 4) розраховані двома вказаними методами співпадають з точністю до 3-го знаку, за умови розгляду пори як ізолюваного об'єкту – коли відсутнє випромінювання у відкритий простір. Якщо врахувати ймовірність випромінювання в простір, значення теплового потоку, за скінченноелементною моделлю зменшиться, що буде відповідати нижчому значенню питомої теплопровідності. Але оскільки необхідно оцінити максимально можливі щільності теплового потоку випромінюванням, то останнім варіантом можна знехтувати.

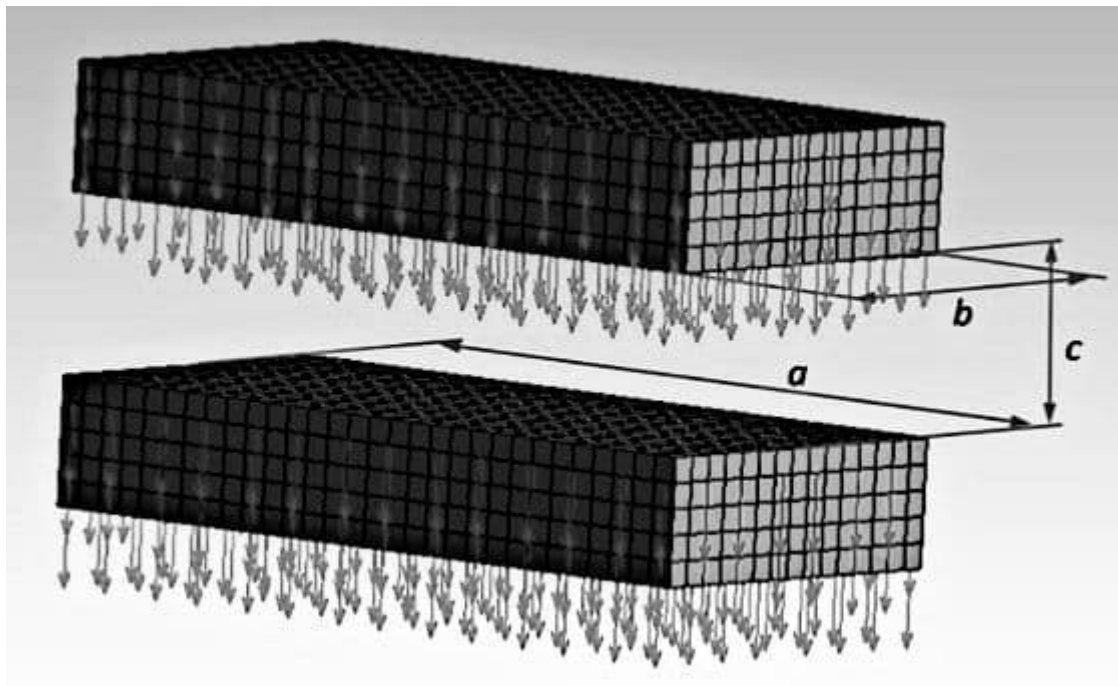


Рисунок 4 – Схема проведення розрахунків теплопровідності випромінюванням в середовищі ANSYS

Обчислені щільності теплових потоків було перераховано в значення питомої теплопровідності (Вт/м·К) і показано на графіках (рис. 5) .

Як показано, приведена питома теплопровідність випромінюванням практично не залежить від градієнта температури в досліджених межах. Основними параметрами, які впливають на показник теплопровідності випромінюванням є температура та коефіцієнт чорноти. За будь-яких умов, обчислені значення теплопровідності випромінюванням складають не більше ніж 0.5 % від значень кондуктивної теплопровідності пористої пресовки. Враховуючи сказане, в практичних розрахунках, теплопровідність випромінюванням через пору розміром 2-10 мкм можна ігнорувати. Одержані результати показують задовільне співпадіння з опублікованими раніше [6, 7, 8]. *Теплопровідність через газову фазу* зазвичай визначають за рівняннями конвекції [11], які опираються на плівковий коефіцієнт тепловіддачі. Однак для умов швидкісного нагрівання електронним променем характерний низький тиск ($<10^{-1}$ Па), а значить – відсутність направлених потоків газу між стінками з різною температурою. Висока температура оточуючого матеріалу обумовлює часткову дисоціацію залишкових молекул газу, а можливість їх іонізації – рух обумовлений електромагнітним полем, що, скоріш за все, може погіршувати теплопровідність такого середовища. Екстраполяція табличних даних теплопровідності газів [12] на тиски та температури технологічного процесу спікання в умовах електронно-променевого нагріву дозволяє стверджувати, що теплопровідність залишкового газового середовища буде складати 10^{-5} – 10^{-7} Вт/м·К, що не може впливати на сумарну теплопровідність пористого тіла, яка визначається за формулою (1).

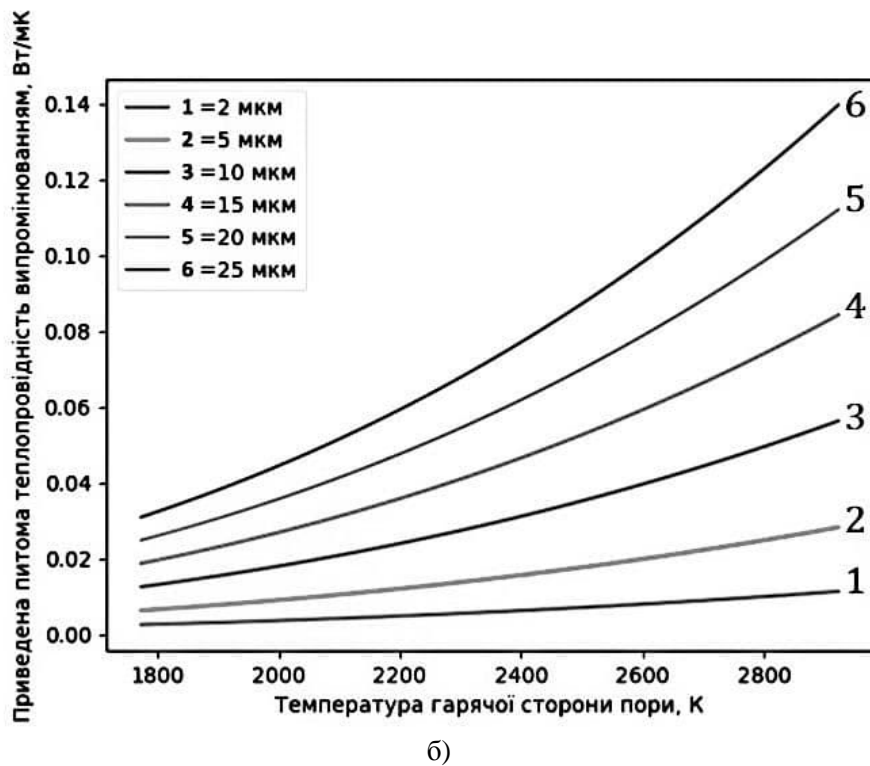
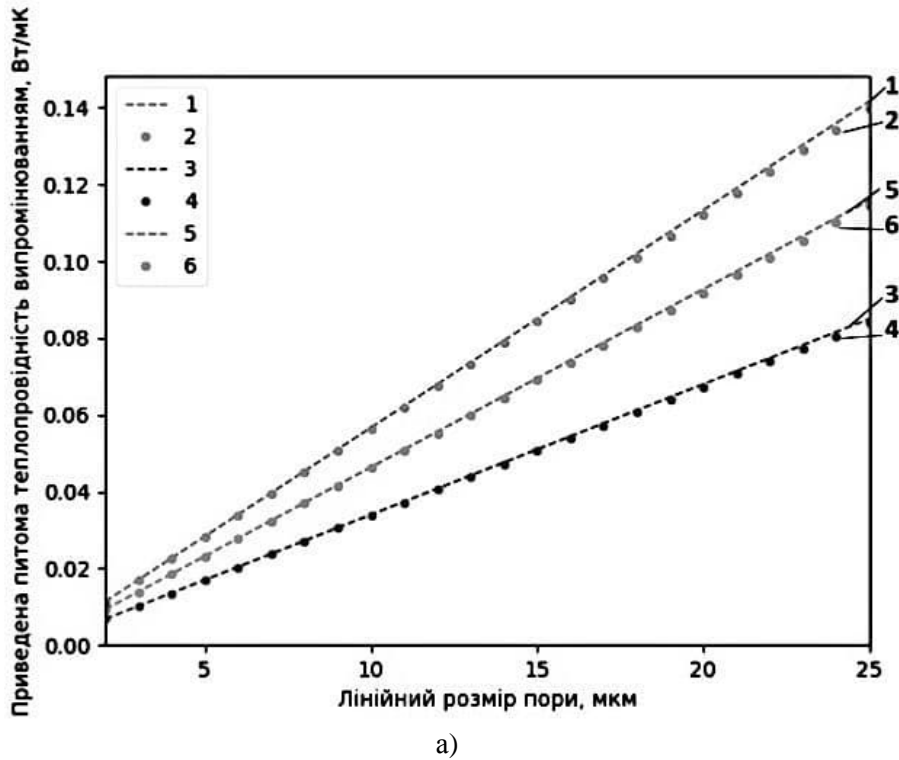


Рисунок 5 – Залежність приведеної питомої теплоємності випромінюванням через пору від розміру пори (а) та від температури високотемпературної стороною пори для різного розміру пори (б).

Залежності 1, 3, 5 відповідають значенню градієнта температури 1000 К/мм, 2, 4, 6 – 10 К/мм; 1, 2 – коефіцієнт чорноти 1.0, 3,4 – коефіцієнт чорноти 0.75, 5, 6 – коефіцієнт чорноти 0.9; залежності рис.5 (б) – градієнт температури 1000 К/мм

Висновки. Таким чином, обґрунтовано застосування методу скінчених елементів для розрахунку питомої теплопровідності пористого середовища. Одержано коефіцієнти лінійної залежності відносної теплопровідності пористого тіла від пористості. Доведено, що за умов швидкісного нагріву у вакуумі при розмірі пор до 25 мкм, визначальну роль відіграє кондуктивна теплопровідність, вплив інших механізмів можна не враховувати.

Показано, що кондуктивна і сумарна теплопровідність пористого тіла може бути розрахована з деяким рівнем невизначеності, який зростає з ростом пористості виробу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Sakae Yagi, Kunil Daizo. Studies on effective thermal conductivities in packed beds. *AIChE Journal*. 1957. Vol. 3. P. 373–381.
2. Argento C., Bouvard D. Modeling the effective thermal conductivity of random packing of spheres through densification. *Int. J. Heat Transfer*. 1996. Vol. 39, № 7. P. 1343–1350.
3. Jingwen Mo, Heng Ban. Measurement and theoretical modeling of effective thermal conductivity of particle beds under compression in air and vacuum. *Case Studies in thermal Engineering*. 2017. Vol. 10. P. 423–433.
4. W. van Antwerpen, Rousseau P. G., C. G. du Toit Multi-sphere. Unit Cell model to calculate the effective thermal conductivity in packed pebble beds of mono-sized. *Nuclear Engineering and Design*. 2012. Vol. 247. P. 183–201.
5. Yusuke Asakuma, Shinsuke Miyauchi, Tsuyoshi Yamamoto [et. al]. Homogenization method for effective thermal conductivity of metal hydride bed. *Int. Journal of Hydrogen Energy*. 2004. Vol. 29. P. 209–216.
6. Yusuke Asakuma, Yushin Kanazawa, Tsuyoshi Yamamoto. Thermal radiation analysis of packed bed by a homogenization method. *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014. Vol. 73. P. 97–102.
7. Yusuke Asakuma, Itsuro Honda, Tsuyoshi Yamamoto. Numerical analysis of effective thermal conductivity with thermal conduction and radiation in packed beds. *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. Vol. 114. P. 402–406.
8. Hao Wu, Nan Gui, Xingtuan Yang [et. al] Effect of scale on the modeling of radiation heat transfer in packed pebble beds. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016. Vol. 101. P. 562–569.
9. Choi Y. S., Brockman R. A. Representation of Materials Constitutive Responses in Finite Element-Based Design Codes. *Computational Methods for Microstructure-Property Relationships*. Springer. 2010. P. 199–238.
10. Михеев М. А., Михеева М. И. Основы теплопередачи. Москва : Энергия, 1977. 344 с.
11. Лыков А. В. Теория теплопроводности. Москва : Высшая школа, 1967. 600 с.
12. Физические величины : справочник / А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский и др.; под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. Москва : Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.

REFERENES

1. Yagi S., & Kunii D. (1957). Studies on effective thermal conductivities in packed beds. *AIChE Journal*, 3(3), 373–381. DOI:10.1002/aic.690030317.
2. Argento C., & Bouvard D. (1996). Modeling the effective thermal conductivity of random packing of spheres through densification. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 39(7), 1343–1350. DOI:10.1016/0017-9310(95)00257-x
3. Mo J., & Ban H. (2017). Measurements and theoretical modeling of effective thermal conductivity of particle beds under compression in air and vacuum. *Case Studies in Thermal Engineering*, 10, 423–433. DOI:10.1016/j.csite.2017.10.001
4. Antwerpen, W. V., Rousseau, P., & Toit, C. D. (2012). Multi-sphere Unit Cell model to calculate the effective thermal conductivity in packed pebble beds of mono-sized spheres. *Nuclear Engineering and Design*, 247, 183–201. DOI:10.1016/j.nucengdes.2012.03.012
5. Asakuma, Y. (2004). Homogenization method for effective thermal conductivity of metal hydride bed. *International Journal of Hydrogen Energy*, 29(2), 209–216. DOI:10.1016/s0360-3199(03)00106-x.

6. Asakuma, Y., Kanazawa, Y., & Yamamoto, T. (2014). Thermal radiation analysis of packed bed by a homogenization method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 73, 97–102. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.01.065.

7. Asakuma Y., Honda I., & Yamamoto T. (2017). Numerical analysis of effective thermal conductivity with thermal conduction and radiation in packed beds. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 114, 402–406. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.06.083.

8. Wu H., Gui N., Yang X., Tu J., & Jiang S. (2016). Effect of scale on the modeling of radiation heat transfer in packed pebble beds. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 101, 562–569. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.05.090

9. Choi Y. S., & Brockman R. A. (2010). Representation of Materials Constitutive Responses in Finite Element-Based Design Codes. *Computational Methods for Microstructure-Property Relationships*, 199–238. DOI:10.1007/978-1-4419-0643-4_6.

10. Mikheev M. A., & Mikheeva I. M. (1977). *Osnovy teploperedachi*. Moskva : «Energiia».

11. Lykov A. V. (1967). *Teoriya teploprovodnosti*. Moskva : «Vysshaya shkola».

12. Grigoriev I. S., & Meilikhov E. Z. (1991). *Fizicheskie velichiny : spravochnik*. Moskva : «Energoatomizdat».

Степанов О. В., Романенко Ю. Н., Лобода П. И., Андриенко Ю. Е., Богомол Ю. И. РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПОРИСТОГО ТЕЛА ДЛЯ УСЛОВИЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО НАГРЕВА

Целью исследования является анализ поля температурного градиента, средствами математического моделирования для определения эффективной теплопроводности пористых заготовок из порошка молибдена в условиях электронно-лучевого нагрева.

Проанализированы вклад различных механизмов переноса тепла в условиях электронно-лучевого нагрева пористых заготовок. В результате исследования были получены коэффициенты линейной зависимости относительной теплопроводности пористого тела от пористости. Доказано, что в условиях скоростного нагрева в вакууме при размере пор до 25 мкм, определяющую роль играет кондуктивная теплопроводность, влияние других механизмов можно не учитывать. Показано, что кондуктивная и суммарная теплопроводность пористого тела может быть рассчитана с некоторым уровнем неопределенности, который растет с ростом пористости изделия.

Предложено проводить расчеты значение удельного теплопроводности пористого тела путем компьютерного моделирования с применением метода конечных элементов. Данный подход позволяет количественно и качественно оценить теплофизические параметры процесса спекания высокоэнергетическими источниками нагрева с учетом пористости порошковых тел.

Статья содержит подробный анализ тепловых эффектов, присущих процессу спекания, с построением математических моделей теплопередачи в пористой среде. Результаты исследования могут быть использованы при разработке технологии электронно-лучевого спекания различных порошковых материалов, термообработке, оптимизации уже существующих процессов.

Ключевые слова: математическое моделирование; теплопроводность пористость; спекания; поле температурного градиента; электронно-лучевой нагрев.

Stepanov O. V., Romanenko Yu. M., Loboda P. I., Andriienko Yu. Ye., Bogomol Iu. I. CALCULATION OF EFFICIENT THERMAL CONDUCTIVITY OF A POROUS BODY FOR ELECTRONIC HEATING CONDITIONS

The aim of the study is to analyze the temperature gradient field by means of mathematical modeling to determine the effective thermal conductivity of porous blanks of molybdenum powder under conditions of electron beam heating.

The contribution of different heat transfer mechanisms in the conditions of electron beam heating of porous workpieces is analyzed. As a result of the study, the coefficients of the linear dependence of the relative thermal conductivity of the porous body on the porosity were obtained. It is proved that under conditions of high-speed heating in vacuum at a pore size of up to 25 μm, the determining role is played by conductive thermal conductivity, the influence of other mechanisms can be ignored. It is shown that the conductive and total thermal conductivity of a porous body can be calculated with some level of uncertainty, which increases with increasing porosity of the product.

It is proposed to calculate the value of the specific thermal conductivity of the porous body by computer simulation using the finite element method. This approach allows to quantitatively and qualitatively assess

the thermophysical parameters of the sintering process by high-energy heat sources, taking into account the porosity of the powder bodies.

The article contains a detailed analysis of the thermal effects inherent in the sintering process, with the construction of mathematical models of heat transfer in a porous medium. The results of the study can be used in the development of electron-beam sintering technology of various powder materials, heat treatment, optimization of existing processes.

Keywords: *mathematical modeling; thermal conductivity; porosity; sintering; temperature gradient field; electron beam heating.*

© Степанов О. В., Романенко Ю. Н., Лобода П. І., Андрієнко Ю. Є., Богомол Ю. І.

Статтю прийнято
до редакції 22.06.20

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

AUTOMATION AND COMPUTER INTEGRATED TECHNOLOGIES

АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИВОДОВ СУДОВЫХ ПОДЪЕМНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Голощанов С. С., к.т.н., доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання та засобів автоматики Херсонської державної морської академії, e-mail: goloscharov46@gmail.com

Асинхронные машины используются в основном как двигатели. Благодаря повышенной надежности и простоте конструкции они широко применяются в промышленности и на судах морского флота, являясь основными потребителями электрической энергии. Несмотря на указанные преимущества, им присущи и недостатки, из которых наиболее существенными являются плохая регулируемость и малоудовлетворительные пусковые характеристики. И, если при использовании современной силовой электронной базы удастся создать привода с высокими регулировочными показателями, то относительно небольшой пусковой момент и весьма значительные пусковые токи являются серьезным препятствием для применения асинхронного привода в подъемных механизмах из-за ограниченной мощности судовой электростанции. Для получения удовлетворительных пусковых характеристик в основном, используются электропривода на основе глубокопазных и двухклеточных двигателей, однако они обладают относительно невысокими пусковыми моментами и значительными пусковыми токами, что обуславливает довольно большие и относительно длительные провалы бортового напряжения. Альтернативой таким двигателям может служить двигатель на основе массивного ферромагнитного ротора, обладающий значительным пусковым моментом при относительно малой кратности пускового тока. Анализ электромагнитных процессов такого двигателя показывает, что внутренняя часть ротора участия в создании вращающего момента не принимает, поэтому его целесообразно изготавливать в виде полого толстостенного ферромагнитного стакана. Компромиссным вариантом двигателя, обладающего повышенными пусковыми при неплохих рабочих характеристиках может служить двигатель с двухслойным ротором, представляющим собой классическую беличью клетку с насаженным на нее массивным ферромагнитным цилиндром, в котором пусковые характеристики определяются, в основном, ферромагнитным цилиндром, а рабочие – параметрами беличьей клетки. В статье уточняется методика определения динамического момента и на ее основе времени пуска двигателя а также приводится попытка оптимизации выбора толщины стенки ферромагнитного ротора в зависимости от возлагаемых на него требований в части пусковых и рабочих характеристик.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, ферромагнитный ротор, пусковой момент, пусковой ток, момент инерции, электромагнитное поле.

DOI: 10.33815/2313-4763.2020.2.23.119–125

Вступление. Трехфазные асинхронные машины с короткозамкнутым ротором составляют основу современного промышленного и судового электропривода. Отсутствие скользящих контактов, удобство обслуживания, надежность в эксплуатации, высокие технико-экономические показатели делают их незаменимыми в электроприводах судовых грузоподъемных механизмов, якорно-швартовых, рулевых и подруливающих устройствах [1, 2, 6].

Актуальность. В то же время следует отметить и недостатки таких двигателей, из которых наиболее существенными являются малоудовлетворительные регулировочные и пусковые характеристики [3, 8, 12, 13]. Поэтому актуальным является совершенствование их конструкций с целью получения, в частности, улучшенных пусковых характеристик.

Расчетный анализ показывает, что традиционные двигатели, имеющие характеристику вида рис.1, имеют относительно небольшой динамический момент, что обуславливает недопустимо большое время разгона привода. При этом двигатель при разгоне до скорости 75-90% от номинальной потребляет ток на уровне пускового, обуславливая относительно длительные провалы бортового напряжения [6, 7, 9].

Поэтому, как правило, в подъемных механизмах применяют глубокопазные или двухклеточные двигатели, обладающие повышенным пусковым моментом и относительно небольшим пусковым током. Однако и применение указанных типов двигателей полностью не решает указанных проблем, что диктует необходимость приема альтернативных решений [4, 5, 10, 11].

Целью статьи является совершенствование анализа динамических параметров приводов судовых подъемных механизмов для обеспечения возможно максимальной производительности при погрузочно-разгрузочных работах и уменьшения влияния пусковых режимов приводов на качество бортового напряжения судна.

Основная часть. Значительный парк асинхронных двигателей (АД) составляют судовые грузоподъемные механизмы, производительность которых, помимо скорости подъема или опускания груза, определяется также временем пуска двигателя. По литературным данным [1, 2] время пуска определяется как разница величин пускового момента $M_{пуск}$ двигателя и момента сопротивления M_c . При этом не принимается во внимание конфигурация кривой момента двигателя, что приводит к существенной ошибке. Ниже приводится методика определения времени разгона привода при произвольной форме кривой момента.

В общем случае уравнение движения привода:

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt},$$

где M – двигательный момент, M_c – момент сопротивления, J – приведенный к двигателю момент инерции механизма, включая и момент инерции ротора, ω – скорость ротора, t – время.

Решая его, определяем время разгона (пуска) двигателя:

$$t_n = J \int_0^{\omega_{ном}} \frac{1}{M - M_c} d\omega.$$

учитывая, что угловая скорость ω и скольжение s связаны соотношением $\omega = \omega_0(1-s)$, $d\omega = -\omega_0 ds$; здесь ω_0 – скорость поля, постоянная величина.

Тогда время разгона определится как:

$$t_n = J \int_1^{s_{ном}} \frac{\omega_0}{M - M_c} ds = J \omega_0 \cdot \frac{1}{S_{M-M_c}} \Big|_1^{s_{ном}},$$

где $S_{M-M_c} \Big|_1^{s_{ном}} = M_{дин}$ – динамический момент, или площадь, заключенная под разностью кривых M и M_c .

С учетом этого время разгона определится как:

$$t_n = k_{mp} J \omega_0 \cdot \frac{1}{M_{дин}},$$

где $k_{mp} = 1,1 \div 1,3$ – коэффициент, учитывающий момент инерции трансмиссии.

Кривая $M = f(s)$ носит резко нелинейный характер, зачастую имея явно выраженный максимум. На этой кривой всегда можно определить четыре точки:

1. Режим идеального холостого хода: $M = 0$, $s = 0$;
2. Номинальный режим: $M = M_{ном}$, $s = s_{ном}$;
3. Режим максимального момента (критическая точка): $M = M_{макс}$, $s = s_{кр}$;
4. Пусковой режим: $M = M_{пуск}$, $s = 1$.

Все эти точки определяются по паспортным данным двигателя и по каталогу; величину $s_{кр}$ можно вычислить по формуле $s_{кр} = s_n \cdot (k_m + \sqrt{k_m^2 - 1})$, $k_m = M_{макс} / M_{ном}$.

С достаточной степенью точности кривую $M = f(s)$ можно заменить кусочно-ломаной прямой, проходящей через четыре указанные точки, как показано на рис. 1.

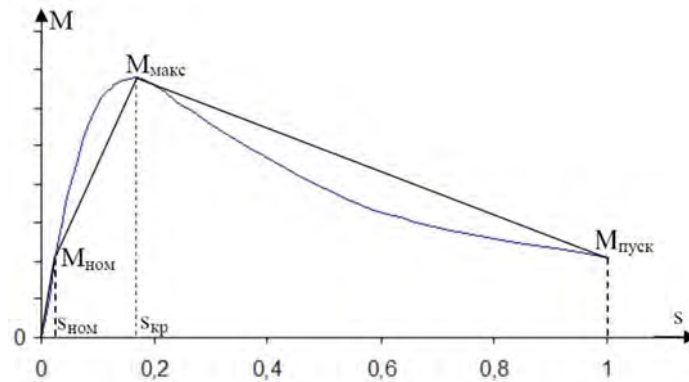


Рисунок 1 – Кусочно-линейная аппроксимация кривой момента $M = f(s)$

Площадь, заключенная под кривой $M = f(s)$ на участке $s=1$ до $s=s_{ном}$ определится как:

$$M \approx \frac{M_{пуск} + M_{макс}}{2} \cdot (1 - s_{кр}) + \frac{M_{макс} + M_{ном}}{2} \cdot (s_{кр} - s_{ном}).$$

Если же кривая $M = f(s)$ имеет монотонный вид, что имеет место в двигателях с массивными ферромагнитными роторами (рис. 2), то площадь под кривой будет равна

$$M \approx \frac{M_{пуск} + M_1}{2} \cdot (1 - s_1) + \frac{M_1 + M_{ном}}{2} \cdot (s_1 - s_{ном}).$$

При этом выбор координат точки (M_1, s_1) не критичен: $s_1 = 0,15 \div 0,3$.

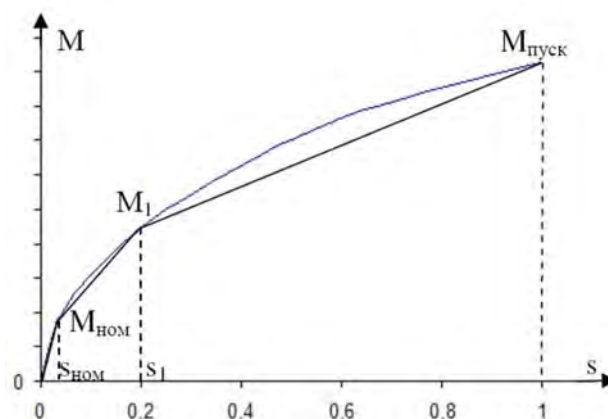


Рисунок 2 – Кусочно-линейная аппроксимация кривой, имеющей $M = f(s)$ монотонный характер

Альтернативой таким двигателям может служить двигатель с массивным ферромагнитным ротором, который имеет механическую характеристику, представленную на рис. 2. Омеднение ротора способствует повышению его рабочего и пускового моментов [4]. Также для улучшения рабочих характеристик двигателя возможно

применение двухслойного ротора, когда на обычный ротор с беличьей клеткой насажена массивная ферромагнитная гильза.

Анализ электромагнитных процессов, происходящих в массивном ферромагнитном роторе [5, 17], позволяет определить глубину проникновения электромагнитного поля в тело ротора на частоте 50 Гц и прийти к заключению, что поле вглубь ротора при пуске проникает всего лишь на 1–3 мм, имея максимальное значение на поверхности и убывая по экспоненциальному закону. При этом под глубиной проникновения понимается глубина, на которой поле уменьшается в e раз по сравнению с полем на поверхности.

Также глубина проникновения зависит от частоты f и пропорциональна $1/\sqrt{f}$ [5]. Исходя из этого, при скольжении $s = 0,05$ частота поля в роторе равна 2,5 Гц, а глубина проникновения составит примерно 4,5–13,5 мм. Поэтому можно сделать вывод, что внутреннее тело ротора в электромагнитном процессе участия не принимает, что позволяет его исключить, облегчив сам ротор и снизив, таким образом, момент инерции ротора, что уменьшает время его разгона. А, поскольку, поле внутри ротора отсутствует, нет необходимости во внутреннем ферромагнитном статоре, который обычно присутствует в двигателях с полым ротором. При этом сам ротор конструктивно может представлять собой полый толстостенный ферромагнитный стакан.

Примем глубину проникновения поля $\Delta_{c50} = 2$ мм на частоте 50 Гц, тогда на частоте 2,5 Гц $\Delta_{c2,5} = \Delta_{c50} \sqrt{\frac{50}{2,5}} = 8,94$ мм. Рассчитаем долю поля, создающего момент в ферромагнитном стакане, в зависимости от толщины последнего при пуске ($s=1$) и при $s=0,05$

Таблица 1 – Пусковых характеристики толщины тела ротора

Толщина тела ротора, мм		2	6	8,94	10	14	18
Величина поля, создающего момент, д.е.	при $s=1$	0,63	0,95	0,99	0,99	1	1
	при $s=0,05$	0,2	0,49	0,63	0,67	0,79	0,87

Из приведенной таблицы видно, что для получения хороших пусковых характеристик толщина тела ротора может не превышать 6 мм. Если же, кроме хороших пусковых необходимо получить и удовлетворительные тяговые характеристики, толщину стенки ротора необходимо увеличить примерно вдвое.

Важной особенностью двигателей с массивным ферромагнитным ротором, выполненном в виде толстостенного стакана является малый момент инерции, уменьшение которого вызывает пропорциональное уменьшение времени разгона двигателя при старте, что особенно важно при его применении в судовых подъемных механизмах. Как правило, асинхронные двигатели подъемных механизмов выполняются с увеличенным соотношением длины ротора к его диаметру, что снижает момент инерции ротора.

Если спроектировать двигатель на основе статора мощностью 30 кВт, то при соотношении длина-диаметр ротора 2:1 и обычных электромагнитных нагрузках длина его ротора будет равна около 30 см при диаметре 15 см. Масса ротора с беличьей клеткой будет равна:

$$m = \frac{\pi D^2}{4} l d = \frac{\pi \cdot 15^2}{4} \cdot 30 \cdot 7,8 \cdot 10^{-3} = 41,35 \text{ кг,}$$

где $D = 15$ см – диаметр ротора, $l = 30$ см – его длина, $d = 7,8$ г/см³ – удельный вес стали.

Момент инерции J такого ротора равен

$$J = m \frac{D^2}{8} = 41,35 \cdot \frac{15^2}{8} \cdot 10^{-4} = 0,116 \text{ кгм}^2.$$

В случае массивного ферромагнитного полого ротора с толщиной стенки 6 мм его масса будет равна 6,35 кг, а момент инерции – 0,033 кгм². При толщине стенки 12 мм масса составит 12,2 кг, момент инерции – 0,0584 кгм². Таким образом, только за счет уменьшения момента инерции ротора время разгона двигателя может быть снижено в первом случае в 3,5 раза во втором в 2 раза.

Также, следует отметить, что массивный ротор такого двигателя обладает повышенной механической прочностью, что позволяет его использовать на сверхвысоких скоростях вращения (десятки и сотни тысяч оборотов в минуту).

Основной же особенностью двигателя с массивным ротором является его повышенный пусковой момент при одновременном снижении пускового тока, что особенно важно при ограниченной мощности судовой электростанции.

Для подъемных механизмов на судах применяются двигатели с двойной беличьей клеткой, которые также имеют повышенный пусковой момент при относительно небольшой кратности пускового тока. Однако, если в двигателях с двойной клеткой кратность пускового момента достигает 2,5–3 при кратности пускового тока 5–6, то в двигателях с массивным ротором этот параметр можно довести до уровня 4–5, при кратности тока 4–5, что также положительно сказывается на пусковых характеристиках.

Таким образом, применение указанных двигателей в судовых подъемных механизмах позволяет значительно улучшить их динамические параметры при одновременном снижении бросков нагрузки в питающей сети как по величине, так и по длительности.

Выводы. Приведенный расчет динамического момента позволяет уточнить определение времени разгона асинхронного электропривода с произвольной формой кривой момента, что дает возможность оптимизировать вид механической характеристики. Применение асинхронного двигателя с массивным полым ротором в судовых подъемных механизмах позволит улучшить не только электромагнитные параметры двигателя, снизив кратность пускового тока и повысив пусковой момент, что сокращает время разгона привода, уменьшает провалы напряжения бортовой сети и их длительность, но и механические характеристики – момент инерции ротора, что также способствует уменьшению времени разгона и его длительности и снижает материалоемкость и вес двигателя. Представленная методика расчета может быть принята за основу и при анализе параметров двигателя с двухслойным ротором, сочетающем в себе высокие динамические и рабочие показатели.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чекунов К. А. Судовые электроприводы и электродвижение судов. Ленинград : Судостроение, 1989. 464 с.
2. Савенко А. Е. Судовые электроприводы : учеб. пособие. Керчь : ФГБОУВО «Керченский государственный морской технологический университет», 2019. 220 с.
3. Hughes A., Drury B. Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications. Newnes, 2013. 440 p.
4. Ищенко И. М., Голощاپов С.С. Расчет асинхронного двигателя с омедненным массивным ферромагнитным ротором. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії : науковий журнал*. Херсон : Херсонська державна морська академія, 2017. № 1 (16). С. 121–125.
5. Куцевалов В. М. Вопросы теории и расчета асинхронных машин с массивными роторами. Москва – Ленинград : Энергия, 1966. 304 с

6. Мезин Е. К. Судовые электрические машины : учебник. Ленинград : Судостроение, 1985. 320 с.
7. Олейников А. М., Мартынов В. Н. Судовые электрические машины. Севастополь: СевНТУ, 2010. 316 с.
8. Кацман М. М. Электрические машины : учебник Москва : Изд. Центр «Академия», 2013. 496 с.
9. Вольдек А. И., Попов В. В. Электрические машины. Машины переменного тока. Санкт Петербург : Питер, 2008. 350 с.
10. Гольдберг О. Д., Свириденко И. С. Проектирование электрических машин. Москва : Высш. шк., 2006. 430 с.
11. Копылов И. П., Клоков Б. К., Морозкин В. П., Токарев Б. Ф. Проектирование электрических машин. Москва : Издательство Юрайт, 2011. 767 с.
12. Bird J. Electrical circuit theory and technology. Elsevier, 2002. 984 p.
13. Hall D. T. Practical marine electrical knowledge. London, Witherby & Co Ltd, 1999. 132 p.
14. Постников И. М. Проектирование электрических машин. Киев : Гос. изд-во техн. л-ры, 1960. 910 с.

REFERENCES

1. Chekunov K. A. (1989). *Sudovihe ehlektroprivodih i ehlektrodvizenie sudov*. Leningrad : Sudostroenie.
2. Savenko A. E. (2019). *Sudovihe ehlektroprivodih : ucheb. posobie*. Kerchj : FGBOUVO «Kerchenskiyj gosudarstvenniyj morskoyj tekhnologicheskijj universitet.
3. Hughes A., Drury B. (2013). *Electric Motors and Drives: Fundamentals Types and Applications* Newnes.
4. Ithenko I. M., Golothapov S. S. (2017). Raschet asinkhronnogo dvigatelya s omednennim massivnim ferromagnitnim rotorom. *Naukoviyj visnik Khersonskoj derzhavnoj morskoj akademii : naukoviyj zhurnal*. Kherson : Khersonsjka derzhavna morsjka akademiya, 1 (16), 121–125.
5. Kucevalov V. M. (1966). *Voprosih teorii i rascheta asinkhronnikh mashin s massivnimi rotorami*. Moskva – Leningrad : Ehnergiya.
6. Mezin E. K. (1985). *Sudovihe ehlektricheskie mashinih : uchebnik*. Leningrad : Sudostroenie.
7. Oleynikov A. M., Martihnov V. N. (2010). *Sudovihe ehlektricheskie mashinih*. Sevastopol j: SevNTU.
8. Kacman M. M. (2013). *Ehlekticheskie mashinih : uchebnik*. Moskva : Izd. Centr «Akademiya».
9. Voljdek A. I., Popov V. V. (2008). *Ehlekticheskie mashinih. Mashinih peremennogo toka*. Sankt Peterburg : Piter.
10. Goljdberg O. D., Sviridenko I. S. *Proektirovanie ehlektricheskikh mashin*. Moskva : Vihssh. shk., 2006. 430 s.
11. Kopihlov I. P., Klovok B. K., Morozkin V. P. & Tokarev B. F. (2011). *Proektirovanie ehlektricheskikh mashin*. Moskva : Izdatel'jstvo Yurayjt.
12. Bird J. (2002). *Electrical circuit theory and technology*. Elsevier.
13. Hall D. T. (1999). *Practical marine electrical knowledge*. London, Witherby & Co Ltd.
14. Postnikov I. M. (1960). *Proektirovanie ehlektricheskikh mashin*. Kiev : Gos. izd-vo tekhn. l-rih.

Голощанов С. С. АНАЛІЗ ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРИВОДІВ СУДНОВИХ ПІДЙОМНИХ МЕХАНІЗМІВ

Асинхронні машини використовуються в основному як двигуни. Завдяки підвищеній надійності і простоті конструкції вони широко застосовуються в промисловості і на судах морського флоту, будучи основними споживачами електричної енергії. Незважаючи на зазначені переваги, їм притаманні і недоліки, з яких найбільш істотними є погана керованість і замалозадовільні пускові характеристики. І, якщо при використанні сучасної силової електронної бази вдається створити приводи з високими регульовальними показниками, то відносно невеликий пусковий момент і вельми значні пускові струми є серйозною перешкодою для застосування асинхронного приводу в підйомних механізмах через обмежену потужність суднової електростанції. Для отримання задовільних пускових характеристик в основному, використовуються електроприводи на основі глибокопазного і двоклітинного двигунів, однак вони мають відносно невисокі пускові моменти і значні пускові струми, що обумовлює досить великі і відносно тривалі провали бортової напруги. Альтернативою таким двигунам може служити двигун на основі масивного феромагнітного ротора, що володіє значним пусковим моментом при відносно малій кратності пускового струму. Аналіз електромагнітних процесів такого двигуна показує, що внутрішня частина ротора участі в створенні крутного моменту не приймає, тому його доцільно виготовляти у вигляді порожньої товстостінної феромагнітної склянки. Компромісним варіантом двигуна, який володіє підвищеними пусковими при непоганих робочих характеристиках може служити двигун з двошаровим ротором, що являє собою класичну білячу клітку з насадженим на неї масивним феромагнітним циліндром, в якому пускові характеристики визначаються, в основному, феромагнітним циліндром, а робочі - параметрами білячої клітини. У статті уточнюється методика визначення динамічного моменту і на її основі час пуску двигуна а також наводиться спроба оптимізації вибору товщини стінки феромагнітного ротора в залежності від покладених на нього вимог в частині пускових і робочих характеристик.

Ключові слова: асинхронний двигун, феромагнітний ротор, пусковий момент, пусковий струм, момент інерції, електромагнітне поле.

Goloschapov S. S. ANALYSIS OF DYNAMIC PARAMETERS OF SHIP LIFTING MECHANISMS

Asynchronous machines are used primarily as motors. Due to their increased reliability and simplicity of design, they are widely used in industry and on ships of the marine fleet, being the main consumers of electrical energy. Despite these advantages, they also have disadvantages, of which the most significant are poor controllability and poor starting characteristics. And, if using a modern power electronic base it is possible to create drives with high control parameters, then a relatively small starting torque and very significant starting currents are a serious obstacle to the use of an asynchronous drive in lifting mechanisms due to the limited capacity of the ship power plant. To obtain satisfactory starting characteristics, electric drives are mainly used on the basis of deep-pit and two-cell engines, however, they have relatively low starting torques and significant starting currents, which causes rather large and relatively long dips in the onboard voltage. An alternative to such motors can be a motor based on a massive ferromagnetic rotor, which has a significant starting torque at a relatively small multiplicity of the starting current. Analysis of the electromagnetic processes of such an engine shows that the inner part of the rotor does not take part in the creation of the torque, therefore it is advisable to manufacture it in the form of a thick-walled hollow ferromagnetic glass. An engine with a double-layer rotor, which is a classic squirrel cage with a massive ferromagnetic cylinder mounted on it, in which starting characteristics are determined mainly by a ferromagnetic cylinder, and the operating characteristics - by the parameters of a squirrel cage, can serve as a compromise version of an engine with increased starting characteristics with good performance characteristics. The article clarifies the method for determining the dynamic torque and, on its basis, the engine start-up time, as well as an attempt to optimize the choice of the wall thickness of the ferromagnetic rotor, depending on the requirements imposed on it in terms of starting and operating characteristics.

Keywords: induction motor, ferromagnetic rotor, starting torque, starting current, moment of inertia, electromagnetic field.

© Голощанов С. С.

Статтю прийнято
до редакції 16.10.20

MATEPIAIO3HABCTBO

MATERIALS SCIENCE

ФОРМИРОВАНИЕ ДВУХФАЗНЫХ ЗОН В ПРОЦЕССЕ ВНУТРЕННЕГО ОКИСЛЕНИЯ БИНАРНЫХ СПЛАВОВ

Абрамов Г. С., к.ф.-м.н., доцент кафедры судовождения и электронных навигационных систем Херсонской государственной морской академии, e-mail: genadabra@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0333-8819;

Абрамов М. Г., преподаватель кафедры информационных технологий и физико-математических дисциплин Херсонского филиала национального университета кораблестроения, e-mail: mike_a@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8662-2529

Изучены закономерности формирования двухфазных областей в процессе внутреннего окисления слаболегированных бинарных сплавов. Целью исследования явилось создание математической модели процесса внутреннего окисления, описывающей кинетику формирования и эволюции зоны внутреннего окисления; исследование закономерностей, управляющих формированием двухфазной области в процессе внутреннего окисления; изучение пространственно-временного изменения параметров структуры двухфазной области – числа частиц окислов, их среднего радиуса и объёма фазы – на различных стадиях эволюции зоны внутреннего окисления.

В работе выполнен теоретический анализ процесса диффузионного насыщения легкоподвижным компонентом бинарных сплавов. Сформулированы условия образования дисперсных частиц окислов. Предложена математическая модель формирования двухфазной области и проведено численное решение систем уравнений, описывающих кинетику формирования и эволюции двухфазной области для различных значений параметров процесса.

Моделированием и экспериментально показано, что распределения параметров структуры двухфазной области имеют сложный немонотонный характер. Определено влияние основных параметров процесса на кинетику формирования двухфазной области в пластине слаболегированных бинарных сплавов на основе никеля. Исследованы все стадии процесса окисления пластины – от зарождения частиц до коалесценции частиц второй фазы.

Результаты работы могут быть использованы для разработки новых технологий термической и химико-термической обработок для дисперсного упрочнения материалов методом внутреннего окисления, как физическая основа для поиска путей обеспечения заданных распределений параметров структуры зоны внутреннего окисления, необходимых для придания данному сплаву требуемого комплекса физико-механических свойств.

Сравнение результатов моделирования и экспериментальных результатов показало их хорошее соответствие, что позволяет рекомендовать их для разработки новых технологий дисперсного упрочнения, новых жаропрочных сталей, дисперсно-упрочненных магнитных материалов и электротехнических сплавов.

Ключевые слова: внутреннее окисление, бинарные сплавы, двухфазная область, зона внутреннего окисления, параметры зоны внутреннего окисления, математическое моделирование, кинетика формирования зоны внутреннего окисления.

DOI: 10.33815/2313-4763.2020.2.23.127–15;

Постановка проблемы. В последние годы значительно расширился круг материалов, необходимые служебные свойства которых обеспечиваются за счёт дисперсного упрочнения твёрдого раствора частицами второй фазы. Наиболее распространёнными приёмами создания таких материалов являются старение в процессе термообработки и методы порошковой металлургии. Однако при получении высокопрочных и жаропрочных материалов нередки случаи, когда необходимые свойства достигаются уже за счёт образования дисперсных частиц второй фазы лишь в приповерхностных слоях материала. Кроме того, часто возникает и необходимость иметь различные свойства в поверхностных слоях изделия и в его объёме, для чего указанные выше методы неприемлемы. Наиболее перспективным методом создания дисперсноупрочнённых приповерхностных слоёв является процесс внутреннего окисления (а также внутреннего азотирования, борирования и т.п.).

Однако и в теоретическом, и в экспериментальном отношении кинетика формирования двухфазной области и её эволюция в процессе внутреннего окисления

изучены недостаточно, что в определённой мере сдерживает и широкое практическое использование процесса внутреннего окисления.

Анализ публикаций по теме исследования. Теоретический анализ процесса внутреннего окисления сложен, так как задача существенно многопараметрическая, а проявления внутреннего окисления многообразны и трудно поддаются систематизации. Анализ литературных данных [1–10] показывает, что существующие модели не рассматривают процесс формирования структуры двухфазной области и не всегда удовлетворительно описывают кинетику роста зоны внутреннего окисления (ЗВО). Для более полного описания процесса внутреннего окисления необходимо учитывать кинетику диффузионного взаимодействия растущих частиц с твёрдым раствором в двухфазной области. Для описания изменения параметров структуры двухфазной области – числа частиц $N(x, t)$, их среднего размера $\bar{R}(x, t)$ и объёма фазы $V_\phi(x, t)$ – необходимо рассматривать функции распределения частиц по размерам в каждом сечении ЗВО.

В свою очередь, отсутствие систематических и достаточно подробных экспериментальных данных затрудняет уточнение и развитие теории процесса внутреннего окисления.

Целью работы явилось создание количественной модели процесса внутреннего окисления бинарных сплавов, описывающей кинетику формирования и эволюции зоны внутреннего окисления; исследование закономерностей, управляющих формированием двухфазной области в процессе внутреннего окисления и изучение пространственно-временного изменения параметров структуры двухфазной области – числа частиц $N(x, t)$, их среднего радиуса $\bar{R}(x, t)$ и объёма фазы $V_\phi(x, t)$ – на различных стадиях эволюции внутреннеокисленной зоны.

В связи с этим в работах [11–18] проведен теоретический анализ процесса диффузионного насыщения легкоподвижным компонентом бинарных сплавов, на основании которого сформулированы условия образования дисперсных зародышей второй фазы и проведено рассмотрение процесса их роста. Сформулирована модель процесса формирования двухфазной области при внутреннем окислении, включающая зарождение частиц новой фазы и их диффузионный рост (растворение) в процессе взаимодействия с твёрдым раствором. Проведено на ЭВМ численное решение системы уравнений, описывающих кинетику формирования двухфазной области, для различных значений параметров процесса внутреннего окисления пластины бинарного сплава. Исследованы все стадии процесса внутреннего окисления пластины – от зарождения до коалесценции частиц второй фазы. Экспериментально изучена кинетика внутреннего окисления сплавов $Ni - Cr$, $Ni - Ti$ и проведено сравнение экспериментальных результатов и результатов моделирования.

Основная часть. Проведём исследование условий образования двухфазной области в процессе внутреннего окисления. В рамках этого исследования рассмотрим вопрос о применимости постоянных коэффициентов диффузии в задаче о диффузионном насыщении бинарного сплава легкоподвижным компонентом, т.е. применительно к диффузии в системах типа $Fe-Me-O$, в которых диагональный коэффициент диффузии элемента O в твёрдом растворе значительно превышает аналогичный коэффициент для легирующего элемента: $D_{11} \gg D_{22}$.

С этой целью методом возмущений решалась система уравнений диффузии в твёрдом растворе трёхкомпонентных систем:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} D_{ii} \frac{\partial C_i}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} D_{ij} \frac{\partial C_i}{\partial x} \quad (i, j = 1, 2; i \neq j)$$

со следующими граничными условиями:

$$\begin{aligned} C_1(0) &= C_1^1; & C_1(\infty) &= C_1^0; \\ C_2(0) &= C_2^1; & C_2(\infty) &= C_2^0; \end{aligned}$$

где $C_i (i = 1, 2)$ – концентрация i -го компонента. (индекс 1 здесь и далее отнесён к компоненту O , 2 – к легирующему элементу) $D_{ij} (i, j = 1, 2)$ – коэффициенты диффузии, которые в общем случае являются функциями концентраций компонентов. Показано, что при выполнении условия:

$$\left| \frac{1}{2} \varepsilon_{12} (C_2^1 - C_2^0) \right| \ll 1$$

можно пользоваться решениями уравнений диффузии (1) с постоянными коэффициентами диффузии D_{11}, D_{12}, D_{22} и $D_{21} = 0$:

$$C_1(\xi) = C_1^1 - \left[C_1^1 - C_1^0 + \frac{D_{12}}{D_{11}} (C_2^1 - C_2^0) \right] \operatorname{erf} \frac{\xi}{2\sqrt{D_{11}}} + \frac{D_{12}}{D_{11}} (C_2^1 - C_2^0) \operatorname{erf} \frac{\xi}{2\sqrt{D_{22}}}$$

$$C_2(\xi) = C_2^1 - (C_2^1 - C_2^0) \operatorname{erf} \frac{\xi}{2\sqrt{D_{22}}},$$

где $D_{12}/D_{11} = \varepsilon_{12} C_1^1$, $\varepsilon = x/\sqrt{t}$ – обобщённая координата, ε_{12} – параметр взаимодействия.

В работе проведено сравнение численного решения уравнений (с коэффициентами диффузии, зависящими от концентрации) с решением для различных значений C_2^0 (и, соответственно, параметра $A = |1/2 \varepsilon_{12} (C_2^1 - C_2^0)|$). Получена зависимость максимального относительного отличия этих решений от величины параметра A , которая позволяет оценивать погрешность, связанную с использованием постоянных коэффициентов диффузии. Так, для значений параметра A , не превышающих 0,19, относительная ошибка решения не превышает 5 %.

С использованием соответствующих изотермических разрезов тройной диаграммы равновесия типа $Fe-Me-O$ рассмотрены условия образования дисперсной фазы $Me_{\omega_2} O_{\omega_1}$, при диффузионном насыщении бинарных сплавов. Условием образования зародышей новой фазы является наличие пересыщения твёрдого раствора. Для анализа насыщения твёрдого раствора введена функция пересыщения $L(\xi)$:

$$L(\xi) = \Phi(\mu_1, \mu_2) - \Phi(\mu_1^p, \mu_2^p) = \frac{2\gamma V_m}{R_k},$$

где R_k – критический радиус зародыша новой фазы, γ – коэффициент поверхностного натяжения, V_m – объём молекулы новой фазы.

Функция $\Phi(\mu_1^p, \mu_2^p)$ является уравнением линии растворимости на изотермическом разрезе тройной диаграммы. Для систем типа $Fe-Me-O$, в которых образуется стехиометрическое соединение $Me_{\omega_2} O_{\omega_1}$, уравнение линии растворимости имеет следующий вид:

$$\Phi(\mu_1^p, \mu_2^p) = \ln \left\{ (a_1^p)^{\omega_1} (a_2^p)^{\omega_2} \right\} = \frac{\Delta G}{kT} \text{ где } a_1^p \text{ и } \omega_i (i = 1, 2) \text{ – соответственно,}$$

термодинамические активности компонентов на линии растворимости и стехиометрические коэффициенты; ΔG – свободная энергия образования соединения $Me_{\omega_2} O_{\omega_1}$.

Используя разложение Вагнера для термодинамических активностей:

$$a_i = C_i \exp(\varepsilon_{ii} C_i + \varepsilon_{ij} C_j + \dots), (i, j = 1, 2)$$

и учитывая малость C_i и ε_{22} имеем:

$$\Phi(\mu_1^p, \mu_2^p) = \ln \left\{ (C_1^p)^{\omega_1} e^{-|\varepsilon_{12}| C_2^p \omega_1} (C_2^p)^{\omega_2} \right\} = \frac{\Delta G}{kT}$$

Функция $\Phi(\mu_1, \mu_2)$ описывает произвольный виртуальный диффузионный путь, который проходит фигуративная точка на диаграмме состояния при изменении состава сплава в диффузионной зоне (рис.1). Если диффузионный путь пересекает двухфазную область, то $L(\xi) > 0$, и это соответствует наличию пересыщения твёрдого раствора.

При условии малости изменения концентраций компонентов в диффузионной зоне можно считать $C_1^p(\xi) = C_1^p(0) = C_1^1$ и $\frac{dC_1^p}{dC_2^p} = const$. Тогда функция пересыщения с учётом может быть записана в виде:

$$L(\xi) = \left\{ \begin{array}{l} \omega_1(C_2^0 - C_2^1)|\varepsilon_{12}| \left[1 - \frac{dC_1^p}{dC_2^p} \frac{1}{C_1^1|\varepsilon_{12}|} \right] \operatorname{erf} \frac{\xi}{2\sqrt{D_{22}}} - \\ - \left[1 - \frac{C_1^0}{C_1^1} + |\varepsilon_{12}|(C_2^0 - C_2^1) \right] \operatorname{erf} \frac{\xi}{2\sqrt{D_{11}}} \end{array} \right\}$$

Следует, что $L(\xi)$ имеет максимум в координате:

$$\xi_m = 2 \sqrt{D_{22} \ln \left\{ \frac{(C_2^0 - C_2^1)|\varepsilon_{12}| \left[1 - \frac{dC_1^p}{dC_2^p} \frac{1}{C_1^1|\varepsilon_{12}|} \right] \sqrt{\frac{D_{11}}{D_{22}}}}{1 - \frac{C_1^0}{C_1^1} + |\varepsilon_{12}|(C_2^0 - C_2^1)} \right\}}$$

При выполнении условий:

$$\begin{aligned} (C_2^0 - C_2^1) |\varepsilon_{12}| \left[1 - \frac{dC_1^p}{dC_2^p} \frac{1}{C_1^1|\varepsilon_{12}|} \right] &> 0 \\ C_1^1 - C_1^0 + C_1^1|\varepsilon_{12}|(C_2^0 - C_2^1) &> 0 \end{aligned}$$

максимум лежит на интервале $(0, \xi_{\text{гран.}})$ и $L(\xi_m) \geq 0$. Условия (12) и (13) выполняются при $C_2^0 > C_2^1$. Таким образом, при $C_1^p(0) = C_1^1$ и $C_2^p(0) = C_2^1$ т.е. даже при отсутствии пересыщения на внешней поверхности ($L(0) = 0$), зародыши новой фазы могут образовываться в диффузионной зоне, если исходная концентрация легирующего элемента превышает его равновесную концентрацию, устанавливающуюся в процессе насыщения. Анализ показывает, что условия образования двухфазной области тем облегченнее, чем больше разность $(C_2^0 - C_2^1)$, чем ниже концентрация C_2^0 легирующего элемента в исходном бинарном сплаве (при постоянном значении $(C_2^0 - C_2^1)$), чем больше абсолютная величина параметра взаимодействия $|\varepsilon_{12}|$ и чем больше величина отношения коэффициентов диффузии D_{11}/D_{22} (рис. 1).

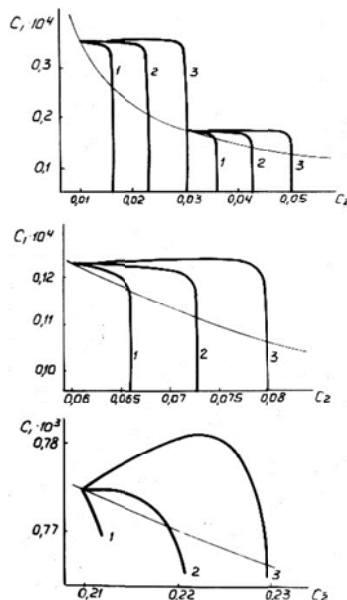


Рисунок 1 – Виртуальные диффузионные пути, рассчитанные по (4) и (5) для различных участков линии растворимости

В работе рассмотрена возможность образования двухфазной области в условиях недосыщенного твёрдого раствора на поверхности ($L(0) < 0$). Показано, что вследствие наличия максимума на кривой $L(\xi)$ может реализоваться случай, когда на некотором удалении от поверхности часть функции пересыщения в окрестности координаты максимума окажется в положительной области. При этом двухфазной зоне должна предшествовать начинающаяся от поверхности зона, свободная от выделений второй фазы (рис. 2).

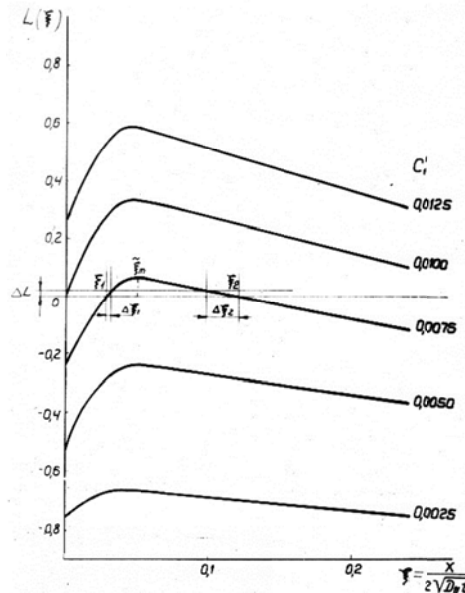


Рисунок 2 – Распределение функции пересыщения $L(\xi)$ в зависимости от концентрации кислорода на поверхности образца C_1^1

Получено экспериментальное подтверждение существования приповерхностной зоны, не занятой частицами второй фазы, при условиях на поверхности, соответствующих недосыщенному твёрдому раствору.

Проведен теоретический анализ вопроса о размытии границы двухфазной области, зависящем от градиента функции пересыщения в точке пересечения $L(\xi)$ с нулевой ординатой (рис. 2). Получено выражение для соотношения величин размытия границ двухфазной области, соответствующих восходящей и ниспадающей ветвям функции пересыщения. На основании этого анализа предложен способ оценки коэффициента диффузии легирующего элемента D_{22} по данным о размытии границ двухфазной области из эксперимента по внутреннему окислению в условиях недосыщения на поверхности.

Рассмотрена кинетика формирования двухфазной области в процессе внутреннего окисления. Сформулирована математическая модель процесса внутреннего окисления, проведено моделирование процесса формирования двухфазной области в пластине бинарного сплава при диффузионном насыщении кислородом и сопоставление результатов моделирования с экспериментальными результатами. Ниже приведена система уравнений, использовавшаяся для описания такого процесса.

В трёхкомпонентных системах, состоящих из твёрдого раствора и частиц новой фазы $Me_{\omega_2}O_{\omega_1}$, уравнения диффузии в твёрдом растворе имеют вид:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = D_{ii} \frac{\partial^2 c_i}{\partial x^2} + D_{ij} \frac{\partial^2 c_j}{\partial x^2} + D_{ii} \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\partial c_i}{\partial x} + D_{ij} \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\partial c_j}{\partial x} + C_{io} \frac{\partial Q}{\partial t}, \quad (i, j = 1, 2; i \neq j),$$

где $Q = \ln(1 - V_\phi)$; $V_\phi = \frac{4}{3} \pi \int_0^\infty R^3 f(R) dR$ – объем частиц новой фазы; C_{io} – концентрация i -го компонента в фазе.

Функция распределения частиц второй фазы по размерам $f(R, t)$ в каждом сечении x (x – координата в направлении, перпендикулярном фронту диффузии) определяется из уравнения непрерывности:

$$\frac{\partial f}{\partial t'} + \frac{\partial v_R f}{\partial R} = \mu(R, t'),$$

где R – радиус частиц, t' – относительное время, отсчёт которого ведётся с момента t_1 появления в данном сечении первых зародышей, $\mu(R, t')$ – скорость появления в данном сечении зародышей второй фазы. Скорость роста зародышей $v_R = \frac{dR}{dt}$ определяется из уравнений массового баланса вещества на границе зародыша и в квазистационарном приближении (учитывая слабую зависимость величины критического радиуса зародыша от времени уже при временах, незначительно превышающих t_1) имеет следующий вид:

$$v_R = \frac{\alpha}{R^2} \left(\frac{R}{R_k} - 1 \right), \alpha = const$$

Функцию зарождения $\mu(R, t')$ определим следующим образом:

$$\mu(R, t') = \mu_0 \exp(-\chi R_k^2) \delta[R - R_k(t)],$$

где $\chi = \frac{8\pi}{3kT} \gamma^2 V_m$, δ – дельта-функция.

Уравнения образуют замкнутую систему, решение которой позволяет отыскивать $f(R, t)$ в каждом сечении и, соответственно, определить число частиц N , средний радиус \bar{R} и суммарный объём второй фазы V_ϕ . Численное решение проводили на примере пластины построением сетки в пространстве R, x, t . Использовалась неявная разностная схема. Для каждого нового шага по времени осуществлялся итерационный процесс между уравнениями до достижения сходимости с высокой точностью.

Результаты моделирования показывают, что пересыщение твёрдого раствора имеет максимум вблизи поверхности, который с течением времени смещается в центр пластины (рис. 3). При больших временах в центре пластины формируется медленно релаксирующая область с максимальным пересыщением твёрдого раствора. Скорость релаксации пересыщения в каждом более глубоком сечении пластины уменьшается. Кинетика изменения пересыщения в каждом сечении пластины (рис. 4) имеет следующие стадии: рост пересыщения до некоторого максимального значения, стадия быстрого снижения пересыщения и продолжительная стадия асимптотического приближения к состоянию равновесия.

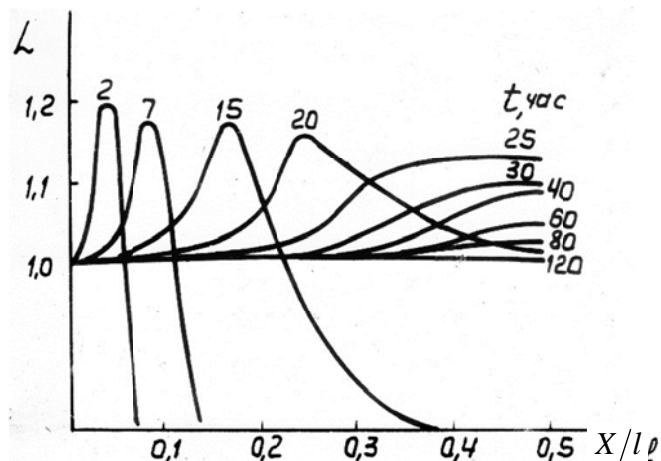


Рисунок 3 – Распределение функции пересыщения по глубине пластины

Соответственно можно выделить и стадии формирования двухфазной области: бурное зарождение и рост частиц; интенсивный рост частиц с затуханием зарождения новых частиц; на асимптотической стадии зарождение отсутствует (пересыщение стремится к нулю), и рост частиц новой фазы за счёт вещества твёрдого раствора постепенно уступает место росту по механизму коалесценции.

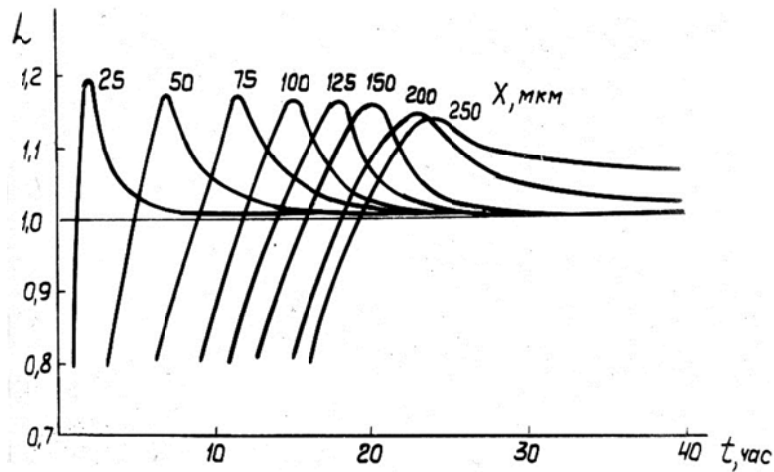


Рисунок 4 – Кинетика изменения функции пересыщения в различных сечениях пластины. Здесь функция пересыщения нормирована на её значение при равновесии

Распределение числа частиц N , среднего радиуса \bar{R} и суммарного объёма второй фазы V_{ϕ} по толщине пластины имеет немонотонный характер (рис. 5, 6). Кривые $N(x)$, $\bar{R}(x)$ и $V_{\phi}(x)$ имеют максимум, который с течением времени смещается к центру пластины. Показано, что зависимость $N(x)$ не может быть однозначно описана выражением вида $N \sim x^n$, так как показатель n при этом зависит и от координаты x и от продолжительности процесса t .

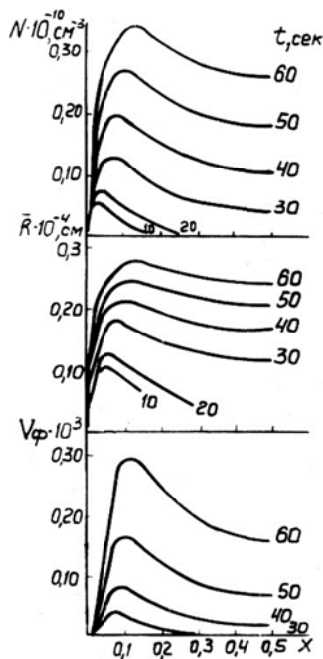


Рисунок 5 – Распределения N , \bar{R} и V_{ϕ} по сечению пластины для различных моментов времени процесса внутреннего окисления

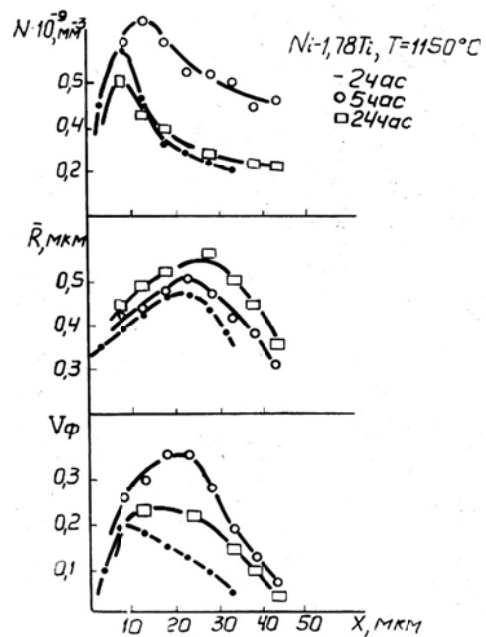


Рисунок 6 – Распределения числа частиц N , их среднего радиуса \bar{R} и объёма фазы V_{ϕ} по толщине пластины сплава $Ni - 1,78\%Ti$

$l = 100 \text{ мкм}, T = 1150^{\circ}\text{C}$

Кинетика продвижения фронта внутреннего окисления в пластине имеет следующую особенность: с приближением к центру пластины скорость движения зоны внутреннего окисления быстро возрастает, что связано с взаимодействием диффузионных потоков от противоположных поверхностей пластины. Время полного внутреннего окисления при этом ускоряется в несколько раз. При незначительном влиянии стоков (объём фазы мал) на диффузию компонентов в твёрдом растворе времена t_1 и t_2 полного

внутреннего окисления пластин различной толщины l_1 и l_2 соотносятся как квадрат отношения их толщин: $t_2/t_1 = (l_2/l_1)^2$.

Сравнение процесса внутреннего окисления в пластинах разной толщины при равных значениях относительного времени t/l^2 показывает, что с ростом толщины пластины возрастает число частиц N , средний радиус \bar{R} и суммарный объём фазы V_ϕ в каждом сечении пластины.

Из численного эксперимента с различным исходным содержанием C_2^0 легирующего элемента следует, что с ростом содержания легирующего элемента число частиц N , их средний радиус \bar{R} и объём фазы V_ϕ в пластине увеличиваются, так как с ростом исходной концентрации C_2^0 при неизменном уровне C_2^1 уровень пересыщения твёрдого раствора повышается.

На основании результатов моделирования процесса внутреннего окисления при постоянной температуре показана возможность получения при термоциклировании «полосчатой» структуры внутреннеокисленной зоны, в которой полосы двухфазной области чередуются с полосами, свободными от выделений второй фазы. Ширина двухфазных полос, их количество и интервалы между ними могут быть регулируемыми параметрами термоциклирования.

На сплаве $Ni - 2,5\%Al - 1,5\%Hf$, а также на сплавах $Ni - Ti$ экспериментально получена полосчатая структура зоны внутреннего окисления (рис. 7).

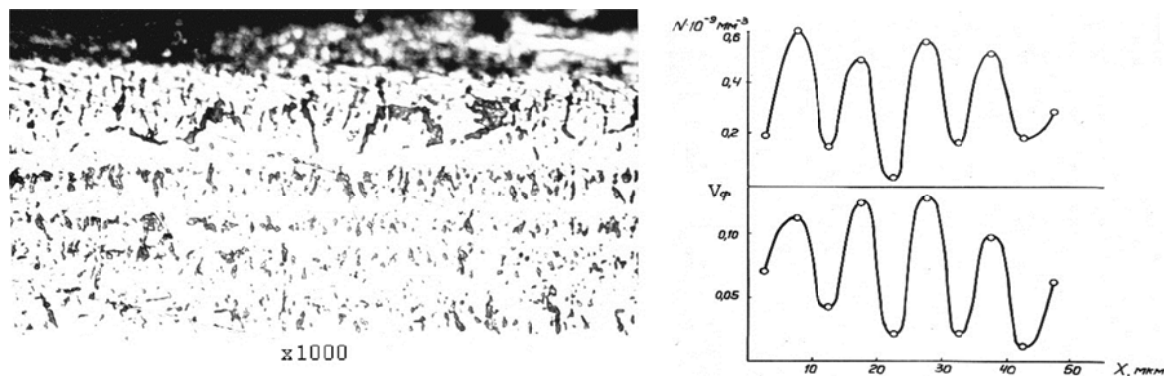


Рисунок 7 – Распределение числа частиц N и объёма фазы V_ϕ по сечению образца $Ni - 2,5\%Al - 1,5\%Hf$, внутреннеокисленного с термоциклированием.

Материал с такой полосчатой структурой зоны внутреннего окисления по сути является композиционным и, следовательно, программированное окисление разбавленных сплавов можно считать перспективным способом получения такого рода композиционных материалов.

Проведено исследование асимптотики процесса внутреннего окисления бинарного сплава. На примере пластины бинарного сплава теоретически рассмотрена асимптотическая стадия внутреннего окисления, проведено моделирование процесса внутреннего окисления в пластине до асимптотической стадии включительно, и экспериментально исследована поздняя стадия процесса внутреннего окисления пластин сплава $Ni - 1\%Cr$.

Теоретически и с помощью моделирования показано, что на асимптотической стадии процесса внутреннего окисления распределения числа частиц N и объёма фазы V_ϕ по толщине пластины слабо изменяются со временем (рис. 8, 9); распределение среднего радиуса частиц \bar{R} по сечению пластины нивелируется и при больших временах процесса \bar{R} не зависит от координаты.

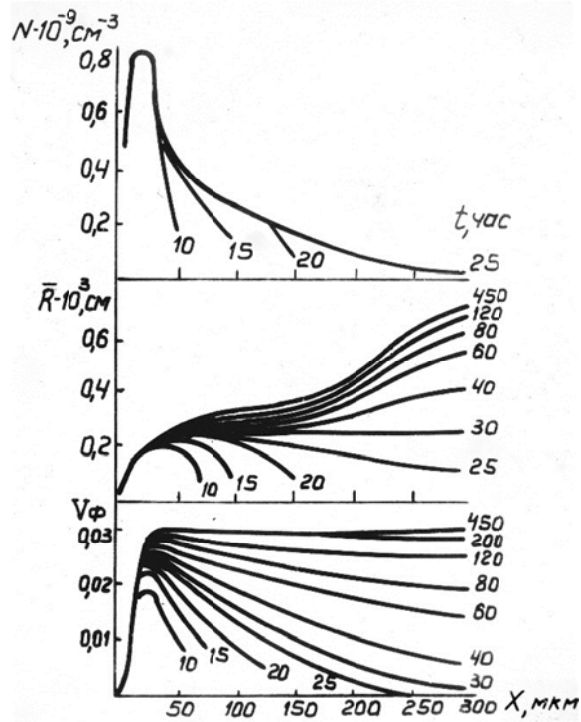


Рисунок 8 – Распределения N , \bar{R} и v_ϕ по глубине пластины для различных времён процесса внутреннего окисления.

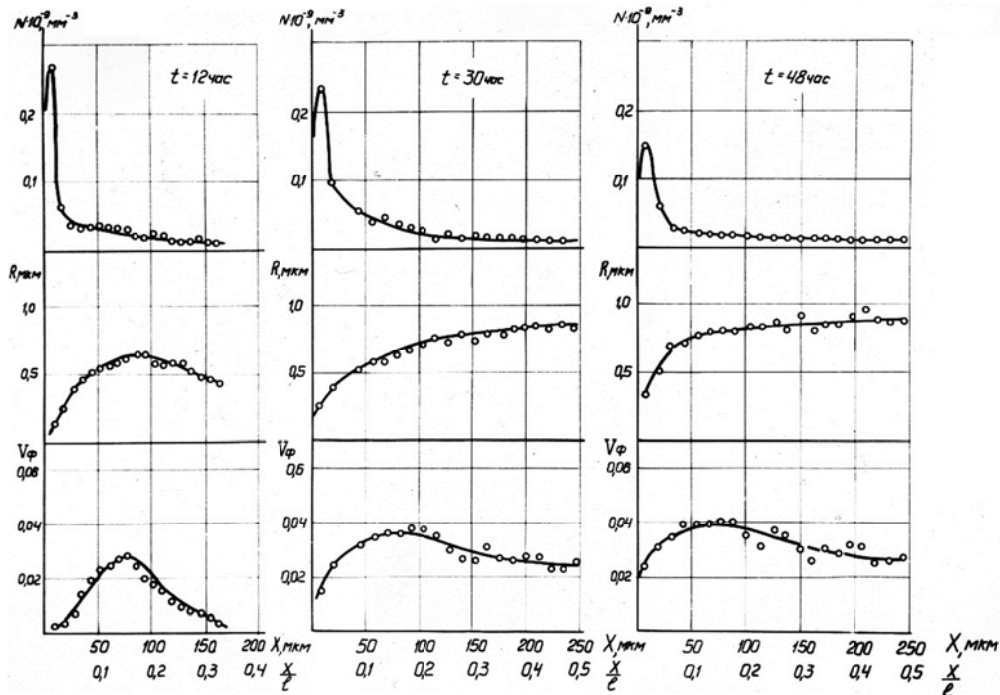


Рисунок 9 – Распределения N , \bar{R} и v_ϕ по сечению пластины сплава $Ni-1\%Cr$ в зависимости от времени внутреннего окисления $l = 500 \text{ мкм}$, $T = 1150^\circ\text{C}$.

Моделирование показывает, что при больших временах, на фоне увеличения среднего размера частиц второй фазы, в данном сечении увеличивается и неоднородность размеров частиц – функция распределения частиц по размерам размывается. В каждом сечении зоны внутреннего окисления с течением времени имеется асимптотическое

приближение критического радиуса частицы R_k к \bar{R} . При этом правый конец функции распределения стремится к точке с абсциссой $R/R_k = 3/2$, однако небольшой «хвост» функции распределения все же остаётся за координатой $R/R_k = 3/2$.

Моделированием и экспериментально исследована кинетика роста среднего радиуса частиц $\bar{R}^n \sim t$. Установлено (рис. 10), что после стадии бурного роста частиц с кинетическим законом, характеризующимся $n \leq 2$, следует стадия медленного роста с $n \gg 3$, которая определяется наличием диффузионного потока вещества на свободные поверхности пластины (в связи с незамкнутостью системы): вещество растворяющихся мелких частиц не полностью поступает на рост крупных.

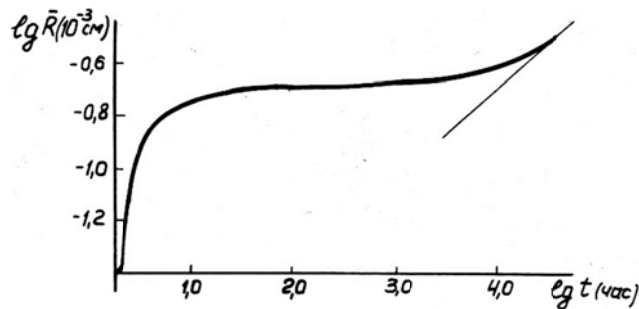


Рисунок 10 – Кинетика роста \bar{R} на асимптотической стадии процесса внутреннего окисления пластины

$$l = 600 \text{ мкм}; x = 25 \text{ мкм}; C_1^0 = 0,0; C_1^1 = 0,01; C_2^0 = 0,12; C_2^1 = 0,10;$$

$$D_{11} = 0,1 \cdot 10^{-7} \frac{\text{см}^2}{\text{с}}; D_{12} = -0,5 \cdot 10^{-9} \frac{\text{см}^2}{\text{с}}; D_{22} = 0,1 \cdot 10^{-11} \frac{\text{см}^2}{\text{с}};$$

$$\alpha = 0,1 \cdot 10^{-17} \frac{\text{см}^3}{\text{с}}; \mu_0 = 0,1 \cdot 10^{16} \text{ с}^{-1}; \chi = 0,35 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}; \omega_1 = 3; \omega_2 = 2;$$

По мере уменьшения градиента пересыщения твёрдого раствора в пластине роль диффузионного потока на свободные поверхности уменьшается, система становится все более замкнутой и реализуется установившаяся асимптотическая стадия процесса – коалесценция Лифшица-Слезова с кинетическим законом $\bar{R}^3 \sim t$. Полученные результаты объясняют наблюдавшиеся экспериментально многими авторами отклонения от кубической кинетики роста \bar{R} в сторону $n > 3$ на поздних стадиях эволюции дисперсных двухфазных систем.

Процесс коалесценции во внутреннеокисленной пластине индивидуален для каждого сечения пластины; в одно и то же время различные сечения зоны внутреннего окисления могут находиться на различных стадиях эволюции двухфазной области – зарождения, роста, неустановившейся и стационарной коалесценции. Вместе с тем, сечения пластины, в зависимости от градиента пересыщения между ними, диффузионно взаимодействуют между собой. Максимум пересыщения на асимптотической стадии снова оказывается вблизи поверхности пластины, однако величина его мала и определяется (в соответствии с законом Гиббса-Томсона) различием \bar{R} в разных сечениях пластины. Диффузионные процессы, связанные с образующимся на этой стадии градиентом пересыщения по толщине пластины, определяют процесс выравнивания \bar{R} по сечению пластины.

Асимптотическое приближение к постоянному объёму фазы происходит сверху, со стороны больших значений, что свидетельствует о некотором преобладающем «подрастворении» частиц второй фазы в процессе перехода к установившейся коалесценции. Этот процесс также связан с диффузионным потоком вещества во внешнюю среду.

Результаты теоретического рассмотрения и моделирования асимптотической стадии

процесса внутреннего окисления находятся в хорошем качественном соответствии с экспериментальными данными по внутреннему окислению сплава $Ni - 1\% Cr$.

Выводы и перспективы дальнейших исследований. Сформулирована физическая модель процесса внутреннего окисления, математически описываемая системой уравнений диффузии в твёрдом растворе трёхкомпонентных систем, содержащих частицы второй фазы, и уравнения непрерывности для функции распределения частиц по размерам. Проведено численное моделирование процесса внутреннего окисления в пластине бинарного сплава для различных значений кинетических и термодинамических параметров.

Показано, что максимум пересыщения с течением времени смещается к центру пластины, где формируется медленно релаксирующая область с максимальным пересыщением. Кинетика изменения пересыщения в каждом сечении имеет такие стадии: рост до некоторого максимального значения; быстрое уменьшение пересыщения и длительная стадия асимптотического приближения к состоянию равновесия. Соответственно можно выделить и стадии формирования двухфазной области: зарождение; рост частиц; на асимптотической стадии рост частиц за счёт пересыщения твёрдого раствора постепенно уступает место росту по механизму коалесценции.

Модель процесса внутреннего окисления, развитая в работе, позволяет выяснить закономерности формирования двухфазной области и расширить наши представления о физике протекания процесса, что даёт возможность эффективного управления процессом внутреннего окисления путём изменения температурно-временных условий и состава внешней среды. Результаты работы могут быть использованы для разработки новых промышленных технологий дисперсного упрочнения материалов методом внутреннего окисления, для создания новых жаропрочных сплавов, дисперсноупрочнённых магнитных материалов и электротехнических сплавов. В частности, представляет интерес разработка технологии на основе программированного внутреннего окисления, с целью получения дисперсноупрочнённых материалов со слоистой композиционной структурой.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кипарисов С.С., Левинский Ю.В. Внутреннее окисление и азотирование сплавов. – М.: Металлургия, 1979. – 200с.
2. Данелия Е.П., Розенберг В.М. Внутреннеокисленные сплавы. – М.: Металлург, 1978. – 232с.
3. Wagner C. Reactionstypen bei der Oxydation von Zegierungen. Z.Electrochem., 1959, Bd.63, s.772–790.
4. Kirkaldy J.S. On the theory of internal oxidation and sulphation of alloys. Canad. Metal. Quarterly, 1969, v.8, p.35–38.
5. Абрамов Г.С., Абрамов М.Г., Бардачёв Ю.Н. Распределение числа частиц в зоне внутреннего окисления.– Физико–технические и технологические приложения математического моделирования.: Сб. научных трудов НАН Украины. Институт математики., Киев, 1998, с.9–12.
6. Абрамов Г.С., Абрамов М.Г. Моделирование перехода от внутреннего окисления к внешнему. – Труды XV Международного симпозиума «Методы дискретных особенностей в задачах математической физики» МДОЗМФ – 2011, с. 15–20.
7. Абрамов Г.С., Абрамов М.Г. Формирование зоны внутреннего окисления при малой свободной энергии формирования окислов. – Вестник ХНТУ, 2011, №3 (42), с. 14–20.
8. Абрамов Г.С., Абрамов М.Г. Математическое моделирование процесса внутреннего окисления в бинарных сплавах; Труды научно–технической конференции «Компьютерное моделирование в наукоёмких технологиях» КМНТ–2012, с.13–16.

9. Абрамов Г.С., Абрамов М.Г. Моделирование процесса формирования структуры диффузионной зоны при одновременном поверхностном и внутреннем окислении сплавов; Вестник ХНТУ, 2012, №1 (44), с. 268–273.

10. Абрамов Г.С., Абрамов М.Г. Формирование двухфазной области при большой свободной энергии формирования окисла легирующих элементов. – Вестник ХНТУ, 2012, №2 (45), с. 12–16.

11. Абрамов Г.С., Абрамов М.Г. Моделирование процесса внутреннего окисления в бинарных сплавах на основе никеля; Труды XVI Международного симпозиума «Методы дискретных особенностей в задачах математической физики» МДОЗМФ –2013.

12. Абрамов Г.С., Абрамов М.Г., Бардачѳв Ю.Н. Влияние циклического изменения температуры на структуру внутреннеокисленной зоны. – Вестник ХНТУ, 2013, №2 (47), с. 6–12.

REFERENCES

1. Kiparisov S.S., Levinskiy Yu.V. Vnutrennee okislenie i azotirovanie splavov. – М.: Metallurgiya, 1979. – 200s.

2. Daneliya E.P., Rozenberg V.M. Vnutrenneokislenyie. splavyi. – М.: Metallurg., 1978. – 232s.

3. Wagner C. Reactionstypen bei der Oxydation von Zegierungen. Z.Electrochem., 1959, Bd.63, s.772–790.

4. Kirkaldy J.S. On the theory of internal oxidation and sulphation of alloys. Canad. Metal. Quarterly, 1969, v.8, p.35–38.

5. Abramov G.S., Abramov M.G., BardachYov Yu.N. Raspredelenie chisla chastits v zone vnutrennego okisleniya.– Fiziko–tehnicheskie i tehnologicheskie prilozheniya matematicheskogo modelirovaniya.: Sb. nauchnyih trudov NAN Ukrainyi. Institut matematiki., Kiev, 1998, s.9–12.

6. Abramov G.S., Abramov M.G. Modelirovanie perehoda ot vnutrennego okisleniya k vneshnemu. – Trudyi XV Mezhdunarodnogo simpoziuma «Metodyi diskretnyih osobenostey v zadachah matematicheskoy fiziki» MDOZMF – 2011, s. 15–20.

7. Abramov G.S., Abramov M.G. Formirovanie zonyi vnutrennego okisleniya pri maloy svobodnoy energii formirovaniya okislov. – Vestnik HNTU, 2011, #3 (42), s. 14–20.

8. Abramov G.S., Abramov M.G. Matematicheskoe modelirovanie protsessa vnutrennego okisleniya v binarnyih splavah; Trudyi nauchno–tehnicheskoy konferentsii «Kompyuternoe modelirovanie v naukoYomkih tehnologiyah» KMNT–2012, s.13–16.

9. Abramov G.S., Abramov M.G. Modelirovanie protsessa formirovaniya strukturyi diffuzionnoy zonyi pri odnovremennom poverhnostnom i vnutrennem okislenii splavov; Vestnik HNTU, 2012, #1 (44), s. 268–273.

10. Abramov G.S., Abramov M.G. Formirovanie dvuhfaznoy oblasti pri bolshoy svobodnoy energii formirovaniya okisla legiruyuschih elementov. – Vestnik HNTU, 2012, #2 (45), s. 12–16.

11. Abramov G.S., Abramov M.G. Modelirovanie protsessa vnutrennego okisleniya v binarnyih splavah na osnove nikelya; Trudyi XVI Mezhdunarodnogo simpoziuma «Metodyi diskretnyih osobenostey v zadachah matematicheskoy fiziki» MDOZMF –2013.

12. Abramov G.S., Abramov M.G., BardachYov Yu.N. Vliyanie tsiklicheskogo izmeneniya temperaturyi na strukturu vnutrenneokislennoy zonyi. Vestnik HNTU, 2013, #2 (47), s. 6–12.

Абрамов Г. С., Абрамов М. Г. ФОРМУВАННЯ ДВОФАЗНИХ ЗОН В ПРОЦЕСІ ВНУТРІШНЬОГО ОКИСЛЕННЯ БІНАРНИХ СПЛАВІВ

Розглянуто закономірності утворення двофазних зон в процесі внутрішнього окислення слабологованих бінарних сплавів. Створена математична модель процесу внутрішнього окислення, що описує кінетику формування та еволюції зони внутрішнього окислення; досліджені закономірності, що керують формуванням двофазної області в процесі внутрішнього окислення; вивчені просторово-часові зміни параметрів структури двофазної області - кількість частинок окислів, їх середній радіус і об'єм фази - на різних стадіях еволюції зон внутрішнього окислення. Проведено теоретичний аналіз процесу дифузного насичення легкорухомими компонентами бінарних сплавів. Сформульовані умови виникнення дисперсних частинок окислів. Запропонована математична модель формування двофазної області та проведено численне рішення систем рівнянь, що описують кінетику формування та еволюцію двофазної області для різних значущих чинників процесу.

Моделюванням та експериментально показано, що розподіл параметрів структури двофазної області, має складний немонотонний характер. Визначені основні параметри процесу, що впливають на кінетику утворення двофазної зони в пластині слабологованих бінарних сплавів на основі нікелю. Вивчені всі стадії процесу окислення пластини - від зародження до коалесценції частинок другої фази.

Результати роботи можуть бути використані для розробки нових технологій термічної та хіміко-термічної обробки для дисперсного зміцнення матеріалів методом внутрішнього окислення, як фізичної основи для пошуку шляхів забезпечення певних розподілів параметрів структури зон внутрішнього окислення, необхідних для надання даному сплаву конкретного комплексу фізико-механічних якостей.

Порівняння результатів моделювання та експериментальних результатів показали їх хорошу відповідність, що дозволяє рекомендувати їх для розробки нових технологій дисперсного зміцнення, нових жароміцних сплавів, дисперсно-зміцнених магнітних матеріалів та електротехнічних сплавів.

Ключові слова: внутрішнє окислення, бінарні сплави, двофазна область, зона внутрішнього окислення, параметри зони внутрішнього окислення, математичне моделювання, кінетика формування зони внутрішнього окислення.

Abramov G. S., Abramov M. G. FORMATION OF TWO-PHASE ZONE DURING INTERNAL OXIDATION OF BINARY ALLOYS

Studied regularities of two-phase regions in the process of internal oxidation lightly doped binary alloys. The aim of the study was to create a mathematical model of the process of internal oxidation kinetics of the formation and evolution of internal oxidation zone; investigation of the laws governing the formation of the two-phase region in the process of internal oxidation; study of spatiotemporal change the two-phase structure - the number of particles of oxides, their average radius and volume phase - at different stages of the evolution of the internal oxidation zone.

In this paper, a theoretical analysis of the process of diffusion saturation lightfast component binary alloys. The conditions of education dispersed oxide particles. A mathematical model of two-phase region and the numerical solution of systems of equations describing the kinetics of formation and evolution of the two-phase region for different values of the process parameters.

Simulation and experimentally shown that the distribution of the two-phase structure parameters are complex nonmonotonic. The influence of the main process parameters on the kinetics of formation of two-phase region in the plate lightly doped binary nickel-based alloys. Studied all stages of the oxidation of the plate - from the origin to the particle coalescence of second phase particles.

The results can be used to develop new technologies of thermal and chemical-thermal treatments for dispersion hardening materials by internal oxidation, as the physical basis for finding ways to ensure the specified parameter distributions of internal oxidation zone structure needed to make this alloy required complex physical and mechanical properties.

Comparison of simulation results and experimental results showed good agreement that allows us to recommend them to develop new technologies dispersion hardening, new heat-resistant steels-hardened magnetic materials and electrical alloys.

Keywords: internal oxidation, binary alloys, two-phase region, the area of the internal oxidation zone of internal oxidation parameters, mathematical modeling, the kinetics of formation of internal oxidation zone.

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 самоцитуювання – 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

- Гладких І. І., Голіков А. О., Олійник Ю. А.** 6
ОЦІНКА СТАНУ ЗНО НА НЕБЕЗПЕЧНОМУ УЧАСТКУ РІКИ ДНІПРО
- Горалик Е. Т., Крюков Н. Н.** 15
ПРО РУХ РЯТУВАЛЬНОЇ ШЛЮПКИ ВІЛЬНОГО ПАДІННЯ ПРИ СХОДЖЕННІ З ПОХИЛОЇ РАМПИ
- Петровський А. В.** 28
РОЗШИРЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ECDIS ЩОДО ПОПЕРЕДНЬОЇ ПРОКЛАДКИ В АКВАТОРІЇ ПОРТУ
- Селиванов С. Є., Годованюк С. П.** 40
МЕТОДИ ЗБЛИЖЕННЯ ПОВІТРЯНОГО АБО МОРСЬКОГО СУДНА З ІНШИМ СУДНОМ, ТА АЛГОРИТМІВ ТРАЄКТОРНОГО КЕРУВАННЯ НИМИ
- Терлич С. В.** 50
БАЛАСТУВАННЯ АВАРІЙНОГО СУДНА ПРИ ПОСАДЦІ НА МІЛИНУ

ІНЖЕНЕРІЯ У ТРАНСПОРТНІЙ ГАЛУЗІ

- Букетов А. В., Гусев В. М., Кулініч А. Г., Якущенко С. В., Житник Д. В.** 59
ОПТИМІЗАЦІЯ ВМІСТУ ІНГРЕДІЄНТІВ ПРИ ФОРМУВАННІ ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ РОБОТИ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ
- Врублевський Р. Є., Самарін О. Є.** 69
ОПТИМІЗАЦІЯ ВИТРАТ ЦИЛІНДРОВОГО МАСЛА ЗАВДЯКИ ОПТИМІЗАЦІЇ АСС-ФАКТОРА
- Кулініч В. Г.** 80
АДГЕЗІЙНІ ТА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НАПОВНЕНИХ ПОЛІСТИРОЛОМ «ОАЗИС» ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ТРАНСПОРТНОЇ ТЕХНІКИ
- Половинка Э. М., Слободянюк Н. В.** 92
СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ ВПРЫСКИВАНИЯ ТОПЛИВА СУДОВОГО СРЕДНЕОБОРОТНОГО ДИЗЕЛЯ
- Степанов О. В., Романенко Ю. М., Лобода П. І., Андрієнко Ю. Є., Богомол Ю. І.** 108
РОЗРАХУНОК ЕФЕКТИВНОЇ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ПОРИСТОГО ТІЛА ДЛЯ УМОВ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО НАГРІВАННЯ

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Голощанов С. С. АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИВОДОВ СУДОВЫХ ПОДЪЕМНЫХ МЕХАНИЗМОВ	119
---	------------

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Абрамов Г. С., Абрамов М. Г. ФОРМИРОВАНИЕ ДВУХФАЗНЫХ ЗОН В ПРОЦЕССЕ ВНУТРЕННЕГО ОКИСЛЕНИЯ БИНАРНЫХ СПЛАВОВ	127
---	------------

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ	140
--	------------

CONTENTS

SEA AND RIVER TRANSPORT

- Gladkykh I. I., Golikov A. A., Oleynik J. A.** 6
ASSESSMENT OF THE ATON'S CONDITION IN DANGEROUS SECTION OF THE DNIEPER RIVER
- Goralik E. T., Kryukov N. N.** 15
ON THE MOVEMENT OF A FREE FALL LIFEBOAT WHEN DESCENDING FROM THE INCLINED RAMP
- Petrovskiy A. V.** 28
EXPANDING ECDIS FUNCTIONALITY FOR PRELIMINARY ROUTING IN THE PORT WATER
- Terlych S.** 40
THE INFORMATION TECHNOLOGIES APPLICATIONS IMPROVISING IN SHIP AND SHIPS CONSTRUCTIONS DURABILITY AND VIBRATION

ENGINEERING IN THE TRANSPORT INDUSTRY

- Buketov A. V., Gusev V. N., Kulinich A. G., Yakushchenko S. V., Zhitnik D. V.** 59
OPTIMIZATION IN PLACE OF INGREDIENTS IN THE FORMULATION OF NEW APPLICATIONS FOR INCREASING THE RESOURCE OF ROBOTS AND TRANSPORT VEHICLES
- Samarin O. E., Vryblevskiy R. Ye.** 69
OPTIMIZATION OF CYLINDER OIL CONSUMPTION DUE TO ACC-FACTOR OPTIMIZATION
- Kulinich V. G.** 80
ADHESIVE AND PHYSICAL MECHANICAL PROPERTIES OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS, FILLED BY POLYSTYRENE «OASIS» FOR TRANSPORT EQUIPMENT
- Polovinka E., Slobodianiuk N.** 92
STATISTICAL MODELING OF CHARACTERISTICS OF THE FUEL INJECTION SYSTEM OF SHIP MIDDLE-TURNING DIESEL
- Stepanov O. V., Romanenko Yu. M., Loboda P. I., Andriienko Yu. Ye., Bogomol Iu. I.** 108
CALCULATION OF EFFICIENT THERMAL CONDUCTIVITY OF A POROUS BODY FOR ELECTRONIC HEATING CONDITIONS

AUTOMATION AND COMPUTER INTEGRATED TECHNOLOGIES

Goloschapov S. S. ANALYSIS OF DYNAMIC PARAMETERS OF SHIP LIFTING MECHANISMS	119
--	------------

MATERIAL SCIENCE

Abramov G. S., Abramov M. G. FORMATION OF TWO-PHASE ZONE DURING INTERNAL OXIDATION OF BINARY ALLOYS	127
--	------------

APPLICATION REQUIREMENTS	140
---------------------------------	------------

Науковий журнал

НАУКОВИЙ ВІСНИК
ХЕРСОНСЬКОЇ ДЕРЖАВНОЇ МОРСЬКОЇ АКАДЕМІЇ

№ 2 (23), 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 21.01.2021. Формат 84×108/32.
Папір офсетний.
Ум. др. арк. 9,75. Наклад 100 прим.

Видавець і виготовлювач ХДМА
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 4319 від 10.05.2012
73000, м. Херсон, просп. Ушакова, 20