

ISSN 2313-4763

Міністерство освіти і науки України

Херсонська державна морська академія

НАУКОВИЙ ВІСНИК
ХЕРСОНСЬКОЇ ДЕРЖАВНОЇ МОРСЬКОЇ АКАДЕМІЇ

Науковий журнал

Виходить двічі на рік

№ 1 (24)

Херсон
2021

Науковий вісник Херсонської державної морської академії : науковий журнал. – Херсон : Херсонська державна морська академія, 2021. № 1 (24). 144 с.

Засновник і видавець – Херсонська державна морська академія

Рекомендовано до друку на засіданні Вченої ради Херсонської державної морської академії (протокол № 12 від 24.06.2021 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 унесено до Переліку наукових фахових видань України категорії «Б» (Наказ МОН України № 886 від 02.07.2020 р.)

Журнал індексується українською загальнодержавною реферативною базою даних «Україніка наукова» міжнародною 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, 2021

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

№ 1 (24)

Kherson
2021

Scientific bulletin Kherson State Maritime Academy: science journal. Kherson : Kherson State Maritime Academy, 2021. № 1 (24). 144 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 № 12 from 24.06.2021)

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 № 18987-7776ІІР 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, 2021

МОРСЬКИЙ ТА РІЧКОВИЙ ТРАНСПОРТ

SEA AND RIVER TRANSPORT

УДК 629.5.047:629.5.048

АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ ЯКІСТЮ ТА КОМФОРТНІСТЮ ПОВІТРЯ СУДНОВИХ ПРИМІЩЕНЬ

Білій В. А., аспірант Національного університету «Одеська морська академія»,
e-mail: bily.viktor@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7107-4862;

Голіков В. А., д.т.н, професор Національного університету «Одеська морська академія»,
e-mail: vlad.ant.golikov@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1688-5670

Метою дослідження є розробка структури системи автоматичного керування (САК) якістю і комфортністю повітря суднового приміщення та постановка задачі автоматичного керування.

Проаналізовано сучасні методи оцінки безпеки газового складу повітря. У результаті встановлено, що створення систем автоматичного керування потребує застосування аналітичних показників безпеки при математичному моделюванні мікроклімату приміщення.

Проведено формалізацію вимог до газового складу повітря. Отримані аналітичні залежності включено в математичну модель мікроклімату приміщення.

Запропоновано альтернативний підхід до забезпечення комфортності помешкання з урахуванням показників якості повітря.

Стаття містить розробку математичної моделі мікроклімату приміщення з урахуванням газового складу повітря. Запропоновано структурну схему системи автоматичного керування і сформульовано задачу автоматичного керування у вигляді задачі багатопараметричної оптимізації. Визначено такі напрями подальших досліджень: верифікація моделі, деталізація структури САК і розробка алгоритму керування, створення прототипу на мікропроцесорній елементарній базі.

Отримані результати дослідження можуть застосовуватись при моделюванні динаміки показників комфортності та безпеки мікроклімату приміщень і створенні систем автоматичного керування.

Ключові слова: безпека мореплавства, якість повітря, газовий склад повітря, комфортність помешкання, багатопараметрична оптимізація

DOI: 10.33815/2313-4763.2021.1.24.006–018

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями. Показниками техніко-експлуатаційної досконалості суден є: транспортна технологічність, конструктивна надійність і безпека, енергоекономічність, економічність, ергономічність, екологічна безпека.

Чинна Морська доктрина України [1] серед інших визначає такі пріоритетні напрями розвитку науково-технічного потенціалу галузі: охорону морського середовища, важливими складовими якої є зменшення обсягу викидів забруднювальних речовин у результаті застосування сучасних технологій та застосування міжнародних екологічних норм у морегосподарській діяльності.

Національна транспортна стратегія України [2] визначає одним з пріоритетних напрямів підвищення рівня безпеки на транспорті. У цьому напрямку планується імплементація у національне законодавство України європейських норм та стандартів; запровадження дієвих систем управління безпекою на транспорті; забезпечення впровадження європейських вимог у сфері перевезення небезпечних вантажів та ін.

Морський та річковий транспорт характеризується єдністю умов праці та проживання, та тривалим знаходженням екіпажу під впливом шкідливих факторів протягом рейсу. Суднові технічні засоби як створюють потрібні умови для перебування екіпажу, так і можуть на них впливати. Екологічна безпека морського транспорту має безпосередній вплив на здоров'я та життя екіпажу більшою мірою, ніж для інших видів транспорту, оскільки має місце акумуляція шкідливих речовин у приміщенні та у тілі людини через знаходження її під впливом забруднювачів тривалий час без перерв. У зоні ризику знаходяться, насамперед, екіпажі суден, що перевозять небезпечні вантажі, такі як танкери-хімовози та танкери-газовози.

Актуальність цього дослідження зумовлена потребою у формалізації міжнародних норм і вимог з екологічної безпеки, що дозволить використовувати їх у математичному

моделюванні тепломасообмінних процесів у повітрі приміщень, сформулювати задачу автоматичного керування, синтезувати САК і розробити відповідні технічні засоби.

Аналіз сучасного стану проблеми. Виділяють наступні судові зони: житлові та виробничі приміщення, пости керування та відкрита палуба. Залежно від типу судна та призначення приміщень, вони поділяються на класи за ступенем помешкання: без присутності, з частковою періодичною присутністю та з цілодобовою присутністю. Залежно від класу помешкання з'являється потреба враховувати людський елемент і пов'язаний з ним соціальний аспект забезпечення безпеки на судні, оскільки потрібно створити умови помешкання людей належного рівня безпеки та комфортності.

Держави прапора та міжнародні встановлюють вимоги до умов праці та проживання екіпажу. В Україні показники безпеки житлових та виробничих приміщень на судах регулюються санітарними правилами, ДСП 7.7.4.-057-2000 та ДСП 7.7.4.-057-99 [3, 4]. Зокрема, до мікроклімату судових приміщень установлені обмеження за температурою, вологістю та швидкістю повітря. Для систем вентиляції висунуті норми обміну повітря та обмеження рециркуляції для забезпечення концентрації вуглекислого газу (CO₂) не вище гранично допустимої. Згідно з Переліком професійних захворювань [4], працівники транспорту знаходяться під впливом хімічних, фізичних та алергенних факторів. Хімічні фактори діють як безпосередньо при контакті з речовиною, так і через вдихання шкідливих газів, летючих сполук та твердих частинок. Найбільшу небезпеку становить забруднення повітря житлових приміщень, оскільки екіпаж не використовує засоби захисту та газотримувальні прилади під час відпочинку.

Існує два підходи для оцінки якості повітря: порівняння концентрацій забруднювачів з максимально допустимими та застосування індексів якості повітря.

Таблиця 1 – Обов'язкові гранично допустимі концентрації

	<i>Регуляторні гранично допустимі концентрації</i>				
	NAAQ/ЕРА	OSHA	МАК, Німеччина	Індія	Південна Корея
CO₂	–	5000 ppm [8г]	5000 ppm [8г] 10000 ppm [1г]	–	1000 ppm
CO	9 ppm [8г] – раз на рік 35 ppm [1г] – раз на рік	50 ppm [8г]	30 ppm [8г] 60 ppm [30хв]	2 mg/m ³ [8г] 4 mg/m ³ [1г]	9 ppm
Формальдегід	–	0.75 ppm [8г] 2 ppm [15хв]	0.3 ppm [8г] 1 ppm – макс. доп.	–	210 µg/m ³
NO₂	0.05 ppm [1г]	5 ppm	5 ppm [8г] 10 ppm [5хв]	40 µg/m ³ [1р] 80 µg/m ³ [24г]	–
O₃	0.08 ppm [8г] 0.12 ppm [1г] – раз на рік	0.1 ppm [8г]	0	100 µg/m ³ [8г] 180 µg/m ³ [1г]	–
PM_{2.5}	15 µg/m ³ [1р] 35 µg/m ³ [24г]	5 mg/m ³ [8г]	1.5 mg/m ³ для PM <4 µm	40 µg/m ³ [1р] 60 µg/m ³ [24г]	–
PM₁₀	150 µg/m ³ [24г]	–	4 mg/m ³	60 µg/m ³ [1р] 100 µg/m ³ [24г]	150 µg/m ³
SO₂	0.03 ppm [1р] 0.14 ppm [24г] – раз на рік	5 ppm [8г]	0.5 ppm [8г] 1ppm - макс. доп.	50 µg/m ³ [1р] 80 µg/m ³ [24г]	0.05 ppm

При застосуванні першого підходу для оцінки ступеня забрудненості повітря, використовують гранично допустимі концентрації, встановлені на міжнародному, державному або галузевому рівні [6]. Гранично допустимі концентрації можуть бути обов'язкові та рекомендовані, застосовуватися виключно до відкритого повітря, повітря промислового середовища або до повітря житлових приміщень.

Обов'язкові гранично допустимі концентрації встановлено на державному рівні у таких країнах: Австралія [7], США (US EPA [8] та OSHA [9]), Німеччина (Deutsche Forschungs Gemeinschaft [10]). Декілька агенцій з контролю за забрудненням, що підпорядковуються Міністерству навколишнього середовища та лісів Індії, створили національні стандарти якості повітря та контролю за забрудненням промислових та житлових середовищ [11]. У Південній Кореї у 2004 році набрав чинності закон «Контроль якості повітря у приміщеннях громадського користування» [12].

Таблиця 2 – Рекомендовані гранично допустимі концентрації

	<i>Рекомендовані гранично допустимі концентрації</i>				
	Канада	WHO	NIOSH	ACGIH	ASHRAE
CO₂	3500 ppm	–	5000 ppm [8г] 30,000 ppm [15хв]	5000 ppm [8г] 30,000 ppm [15хв]	–
CO	11ppm [8г] 25ppm [1г]	90 ppm [15хв] 50 ppm [30хв] 25 ppm [1г] 10 ppm [8г]	35 ppm [8г] 200ppm –макс. доп.	25 ppm [8г]	9ppm [8г]
Формальдегід	0.1 ppm 0.05 ppm	0.1 mg/m ³ (0.081 ppm) [30 хв]	0.016 ppm[8г] 0.1 ppm [15 хв]	0.3 ppm - макс. доп.	0.1 mg/m ³ (0.081 ppm) [30хв] 27 ppb [8г] - макс. доп. 45 ppb (55 µg/m ³) [1г] 7.3 ppb (9 µg/m ³) [8г]
NO₂	0.05 ppm 0.25 ppm [1г]	0.1 ppm[1г] 0.02 ppm [1п]	1 ppm [15 хв]	0.3 ppm [8г]	100 µg/m ³ [1п] 470 µg/m ³ [24г]
O₃	0.12 ppm [1г]	0.064 ppm 120 mg/m ³ [8 h]	0.1 ppm - макс. доп.	0.05 ppm[важ. роб] 0.08 ppm[сер. роб] 0.1 ppm[лег. роб] 0.2 ppm[<2г]	100 µg/m ³ (50 ppb) [8г]
PM_{2.5}	0.1 mg/m ³ [1г] 0.040 mg/m ³	–	–	3 mg/m ³ - макс. доп.	15 µg/m ³
PM₁₀	0.38 ppm [5хв] 0.019 ppm	–	–	10 mg/m ³ - макс. доп.	50 µg/m ³ [1п]
SO₂		0.048 ppm [24 г] 0.012ppm [1 п]	2 ppm [8г] 5 ppm [15хв]	2 ppm [8г] 5 ppm [15хв]	80 µg/m ³ [1п]

Рекомендовані ГДК можуть використовувати національними та галузевими установами у разі потреби встановлення контролю забруднення повітря довколишнього

середовища, робочої зони або житлових приміщень. Федеральна комісія канадського уряду встановила орієнтовні ГДК у 1987 р [13]. У тому ж році Всесвітня організація охорони здоров'я (WHO) встановила орієнтовні ГДК для непромислового зовнішнього середовища та повітря приміщень [14]. Рекомендовані промислові ГДК та тривалість перебування у контрольованому середовищі розроблено Національним інститутом безпеки та охорони здоров'я (NIOSH) [15,17]. Промислові ГДК також було розроблено Американською конференцією урядових промислових гігієністів (ACGIH) для стандартного 40-часового робочого тижня та для одноразової експозиції [16]. Американське товариство інженерів з опалення, охолодження та кондиціонування (ASHRAE) запропонувало рекомендовані ГДК для непромислових середовищ [17].

Безпечність повітря може бути оцінена за допомогою Індексу якості повітря – AQI (Air Quality Index). Наразі, Індекс використовується в Англії, Південній Кореї, Європейському Союзі, Мексиці, Сінгапурі, Індії, Канаді, Китаї, Гонконгу та США. У більшості згаданих країн регіональні агенції та філії зобов'язані щоденно звітувати індекс якості повітря, що дозволяє оцінювати динаміку забруднення повітря на державному рівні та вживати відповідних заходів для його зменшення.

Індекс якості повітря вказує за деякою шкалою на рівень забрудненості від низького до важкого, або на рівень придатності для дихання від придатного до небезпечного. Використовують шкали індексів від 0 до 10, від 0 до 100 та від 0 до 500, де менші значення відповідають чистішому та безпечнішому повітрю, а більші – вищій концентрації забруднювачів.

Більшість країн використовують концентрації озону, діоксиду сірки, оксиду вуглецю, твердих частинок різних фракцій та діоксиду азоту для визначення Індексу якості повітря. Для кожного із забруднювачів розраховують відповідний частковий індекс AQI_i шляхом співвідношення короткострокового середнього значення його концентрації, найчастіше восьми- або двадцятигодинного, з відповідною гранично допустимою концентрацією. Індекс якості повітря приймають таким, що дорівнює значенню найбільшого з часткових індексів забруднювачів:

$$AQI = \text{MAX}(AQI_i).$$

Американською агенцією із захисту навколишнього середовища (US EPA) [18] встановила наступну шкалу Індексу якості повітря:

Таблиця 3 – Шкалу Індексу якості повітря EPA

<i>Індекс якості повітря</i>	<i>Пояснення</i>	<i>Кольоровий код</i>
від 0 до 50	Добре (безпечне) повітря	Зелений
від 51 до 100	Повітря середньої якості	Жовтий
від 101 до 150	Повітря нездорове для чутливих груп	Помаранчевий
від 151 до 200	Нездорове повітря	Червоний
від 201 до 300	Дуже нездорове повітря	Фіолетовий
від 301 до 500	Небезпечне повітря	Бордовий

Для розрахунку часткових індексів по кожному із забруднювачів використовують наступну формулу:

$$AQI_i = \frac{I_j - I_{j-1}}{C_{ji} - C_{(j-1)i}} (c_i - C_{(j-1)i}) + I_{j-1},$$

де AQI_i – частковий індекс забруднювача i ; c_i – концентрація забруднювача i ; C_{ji} верхня границя інтервалу концентрацій, в який потрапляє c_i ; $C_{(j-1)i}$ – нижня границя інтервалу концентрацій, в який потрапляє c_i ; I_{j+1} – значення AQI, що відповідає C_{ji} ; I_j – значення AQI, що відповідає $C_{(j-1)i}$.

Інтервали концентрацій для визначення часткових індексів якості повітря представлені у табл. 4.

Таблиця 4 – Інтервали концентрацій забруднювачів для визначення часткових індексів якості повітря AQI

О ₃ (ppm) 8г	О ₃ (ppm) 1г	PM2.5 (µg/m ³) 24г	PM10 (µg/m ³) 24г	CO (ppm) 8г	SO ₂ (ppb) 1г	NO ₂ (ppb) 1г	AQI
0.054	–	12.0	54	4.4	35	5	50
0.070	–	35.4	154	9.4	75	100	100
0.085	0.164	55.4	254	12.4	185	360	150
0.105	0.204	150.4	354	15.4	304	649	200
0.200	0.404	250.4	424	30.4	604	1249	300
–	0.504	350.4	504	40.4	804	1649	400
–	0.604	500.4	604	50.4	1004	2049	500

Проблеми екологічної безпеки, створення та підтримання екологічного та комфортного середовища перебування людини – суднового мікроклімату, контролю газового складу повітря вирішувалися у працях представників наукової школи НУ «ОМА» В. А. Голікова та К. В. Ходаріної, у дослідженнях Л. М. Шафрана, В. В. Вичужаніна.

В. А. Голіковим [20] було висунуто концепцію мікроклімату, де об’єктом керування виступає людина. З позицій цієї концепції було досліджено характеристики мікроклімату, побудовано математичні моделі тепломасообмінних процесів. Проблеми екологічної безпеки судна знайшли висвітлення у дослідженнях забрудненості судових приміщень, ефективності герметизації житлової надбудови та очищення повітря у фільтрувальних установках різних типів. Була розроблена узагальнена математична модель видалення хімічно небезпечних домішок з повітря та запропоновано САК газовим складом припливного повітря.

У дослідженні [21] запропоновано індекс якості повітря в приміщенні на основі комфорту PMV_{IAQ} :

$$PMV_{IAQ} = \max(PMV_{CO_2}, PMV_{PM_{10}}, PMV_{INCHO}).$$

Індивідуальні індекси якості повітря розраховуються за формулою:

$$PMV_i = A_i \log\left(\frac{x_i}{B_i}\right),$$

де x_i – концентрація забруднювача; A_i та B_i – константи.

Постановка задачі. Метою дослідження є синтез структури системи автоматичного керування якістю та комфортністю повітря суднового приміщення та постановка задачі автоматичного керування. Досягнення поставленої мети потребує вирішення наступних завдань:

- провести аналіз і формалізацію вимог до газового складу повітря;
- синтезувати математичну модель мікроклімату приміщення з урахуванням показників якості та комфортності повітря.

Об’єктом дослідження є мікроклімат суднового приміщення.

Предметом дослідження є розробка математичної моделі мікроклімату суднового приміщення з урахуванням показників якості повітря та синтез структури системи автоматичного керування.

Викладення основного матеріалу дослідження. Залежності часткових індексів якості від концентрацій забруднювачів є неперервними кусково-лінійними функціями і можуть бути представлені аналітичними у вигляді:

$$AQI_i = a_i c_i + b_i + \sum_{j=1}^n w_{ji} |c_i - C_{(j-1)i}|, \quad (1)$$

$$w_{ji} = \frac{k_{ji} - k_{(j-1)i}}{2},$$

$$k_{ji} = \frac{I_j - I_{j-1}}{C_{ji} - C_{(j-1)i}},$$

$$a_i = \frac{k_{i0} + k_{in}}{2},$$

де c_i – концентрація i -го забруднювача; k_{ji} – кут нахилу сегмента j кусково-лінійної функції з індексом i .

Для перетворення значень окремих ГДК та меж інтервалів з табл. 4, які визначені в одиницях виміру ppm , використаємо формулу:

$$c = c_{ppm} \frac{273,15 \cdot M \cdot p}{22,4 \cdot 101300 \cdot (t + 273,15)}, \quad (2)$$

де c – концентрація забруднювача, mg/m^3 ; c_{ppm} – концентрація забруднювача, ppm ; M – молекулярна маса забруднювача, а.о.м; p – тиск суміші, Па; t – температура повітря, $^{\circ}C$.

Динаміка концентрацій c_i забруднювачів у повітрі приміщення визначається залежністю:

$$\frac{dc_i}{dt} V + c_i q_{вп} = c_{i_{пп}} q_{пп}, \quad (3)$$

де c_i – концентрація i -го забруднювача у повітрі приміщення, mg/m^3 ; V – об’єм приміщення; $q_{вп}$ – об’ємна витрата вихідного повітря, m^3/c ; $q_{пп}$ – об’ємна витрата припливного повітря, m^3/c ; $c_{i_{пп}}$ – концентрація i -го забруднювача у припливному повітрі, mg/m^3 .

Для забезпечення належних умов праці та відпочинку повітря службових та житлових приміщень, окрім безпечності, повинно відповідати вимогам комфортності. Стандартом ISO7730 для оцінки комфортності прийнято аналітичну залежність

інтегрального показника комфортності PMV від параметрів повітря, метаболізму та вдягненості людини.

Згідно зі стандартом, алгоритм розрахунку показника PMV на етапі визначення температури поверхні одягу потребує чисельного вирішення рівняння четвертого ступеня, яке передбачає використання ітераційного алгоритму. Для синтезу і дослідження систем автоматичного керування комфортністю було запропоновано використовувати апроксимацію показника PMV алгебраїчними виразами з експоненціальними доданками [20] або поліноміальними залежностями вигляду $PMV_{MET} = f_{MET}(PT)$ для декількох значень рівня метаболізму MET та фіксованого діапазону результативної температури PT [22]. Зазначимо, що обчислення показника PMV за останнім методом для проміжних значень MET потребує додаткової інтерполяції.

Перспективним підходом до розрахунку інтегрального показника комфортності є його апроксимація багатовимірним поліномом, для ефективного обчислення якого можна використовувати схему Горнера. Для оцінки точності апроксимації було проведено обчислювальний експеримент із застосуванням методу багатовимірної поліноміальної регресії, який реалізовано з використанням мови програмування Python та програмної бібліотеки SKIKIT-LEARN. Результати (табл. 5) експерименту показали задовільну точність апроксимації PMV багатовимірними поліномами ступеня 3 та вище:

$$PMV(t, t_p, v_p, \varphi, MET, CLO, W) \approx p^n(t, t_p, v_p, \varphi, MET, CLO, W), \quad (4)$$

де t – температура повітря, °C; t_p – середня радіаційна температура, °C; v_p – швидкість повітря, м/с; φ – відносна вологість, відн. од.; MET – показник метаболізму, met ($1 \text{ met} = 58.2 \text{ Вт/м}^2$); CLO – показник одягненості, відн. од.; W – ефективна зовнішня робота, Вт/м²; n – ступінь полінома.

Таблиця 5 – Точність апроксимації PMV багатовимірним поліномом

Ступінь полінома	Середньоквадратичне відхилення	Коефіцієнт детермінації
2	0.236	0.97
3	0.1153	0.993
4	0.0589	0.9982
5	0.0329	0.9994

Динаміка абсолютної вологості повітря приміщення може бути визначена як:

$$\frac{d\alpha}{dt}V + \alpha q_{\text{вп}} = \alpha_{\text{пп}} q_{\text{пп}} + \dot{m}_{\text{вн}}, \quad (5)$$

де α – абсолютна вологість повітря приміщення, г/м³; $\alpha_{\text{пп}}$ – абсолютна вологість припливного повітря, г/м³; $\dot{m}_{\text{вн}}$ – масова витрата водяної пари від внутрішніх джерел, г/с.

Залежність між абсолютною вологістю та відносною вологістю отримаємо з використанням рівняння стану ідеального газу та варіанта формули Магнуса-Тетенса для визначення тиску насиченої пари, запропонованої Болтоном [19]:

$$\varphi = \frac{\alpha(t + 273,15)}{2,1674 \cdot 6,112 \cdot e^{\frac{17,67 \cdot t}{t+243,5}}} \quad (6)$$

Залежність масового балансу повітря приміщення, динаміки його температури й тиску має вигляд:

$$\left(\frac{1}{p} \frac{dp}{dt} - \frac{1}{T} \frac{dT}{dt}\right) \rho V + 10^{-3} \cdot \frac{R_{\text{сп}} - R_{\text{вп}}}{R} (\alpha_{\text{пп}} q_{\text{пп}} + \dot{m}_{\text{вн}} - \alpha q_{\text{вп}}) + 10^{-3} \sum_{i=1}^N \frac{R_{\text{сп}} - R_i}{R} (c_{i_{\text{пп}}} q_{\text{пп}} - c_i q_{\text{вп}}) = \rho_{\text{пп}} q_{\text{пп}} - \rho q_{\text{вп}} + 10^{-3} \cdot \dot{m}_{\text{вн}}, \quad (7)$$

де p – тиск повітря приміщення, Па; T – температура повітря приміщення, К; ρ – щільність повітря приміщення, кг/м³; $R_{\text{сп}}$, $R_{\text{вп}}$ та R_i – індивідуальні газові сталі відповідно сухого повітря, водяної пари та забруднювача i , Дж/(кг·К); $\rho_{\text{пп}}$ – щільність припливного повітря, кг/м³.

Формула енергетичного балансу приміщення має вигляд:

$$\rho C_v V \frac{dT}{dt} = u_{\text{пп}} \rho_{\text{пп}} q_{\text{пп}} - u \rho q_{\text{вп}} + Q_o + Q_{\text{вн}} \quad (8)$$

де C_v – питома теплоємність повітря приміщення при сталому об'ємі Дж/кг·К; u та $u_{\text{пп}}$ – відповідно питома внутрішня енергія внутрішнього та припливного повітря, Дж/кг; Q_o – тепловий потік від огорожень, Дж/с; $Q_{\text{вн}}$ – тепловий потік від внутрішніх джерел, Дж/с.

Розглянуті залежності (1) – (8) складають математичну модель мікроклімату приміщення, яка дозволяє розглядати його як багатовимірний багатозв'язний об'єкт керування (рис. 1) з п'ятьма регульовальними впливами ($t_{\text{пп}}$, $\varphi_{\text{пп}}$, $C_{\text{пп}}$, $q_{\text{пп}}$, $q_{\text{вп}}$), п'ятьма регульованими величинами (t , φ , C , PMV , AQI) та шістьма збурювальними впливами (Q_o , $Q_{\text{вн}}$, MET , W , $\dot{m}_{\text{вн}}$, CLO).

В операторній формі багатовимірний багатозв'язний ланцюг можна представити наступною залежністю:

$$Y(p) = W(p) \cdot X(p) + V(p) \cdot Z(p), \quad (9)$$

де $Y(p)$ – вектор регульованих величин; $X(p)$ – вектор регульовальних впливів; $Z(p)$ – вектор збурювальних впливів; $W(p)$ – матриця передаткових функцій за каналами керування; $V(p)$ – матриця передаткових функцій за каналами збурення.

Отримана математична модель мікроклімату приміщення дозволяє побудувати багатопараметричну систему автоматичного керування комфортністю та якістю повітря (рис. 2). Завданнями багатопараметричного регулятора є максимально допустимі концентрації забруднювачів, часткові індекси якості, інтегральний показник комфортності PMV , температура й відносна вологість повітря приміщення. Підтримання концентрацій забруднювачів нижче максимально допустимих має найвищий пріоритет і повинно забезпечуватись системою автоматичного керування навіть якщо це призведе до тимчасового виходу температури та вологості повітря за комфортні межі. Наступним за пріоритетом є забезпечення мінімального рівня часткових індексів якості повітря. За умови знаходження концентрацій та часткових індексів забруднювачів у безпечних межах, регулятор багатопараметричної САК мікрокліматом має працювати у режимі підтримання заданих температури й вологості або інтегрального показника комфортності. Для забезпечення тривалого безпечного перебування людей значення максимально допустимих концентрацій забруднювачів та часткових індексів якості повітря мають бути встановлені лише авторизованим фахівцем згідно з державними та галузевими вимогами до газового складу повітря. Значення **уставок** температури, вологості та показника комфортності можуть бути задані користувачами – мешканцями приміщення відповідно до їх уподобань.

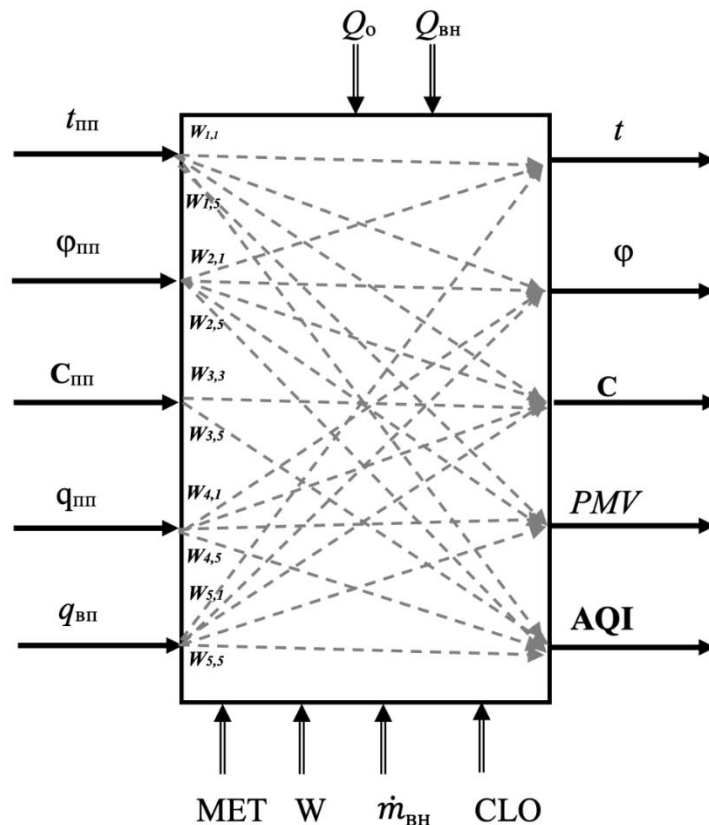


Рисунок 1 – Структурна схема суднового приміщення як багатовимірною багатозв’язного об’єкта керування:

$t_{пп}$, $\phi_{пп}$, $C_{пп}$, $q_{пп}$ – відповідно температура, відносна вологість, вектор концентрацій забруднювачів та об’ємна витрата припливного повітря; $q_{вп}$ – об’ємна витрата вихідного повітря; t , ϕ , C – відповідно температура, відносна вологість та вектор концентрацій забруднювачів повітря приміщення; PMV – інтегральний показник комфортності; AQI – вектор часткових індексів якості повітря; Q_o – тепловий потік від огорожень; MET – середній показник метаболізму мешканців; W – середня ефективна зовнішня робота мешканців; $\dot{m}_{вн}$ – масова витрата водяної пари від внутрішніх джерел; CLO – середня вдягненість мешканців

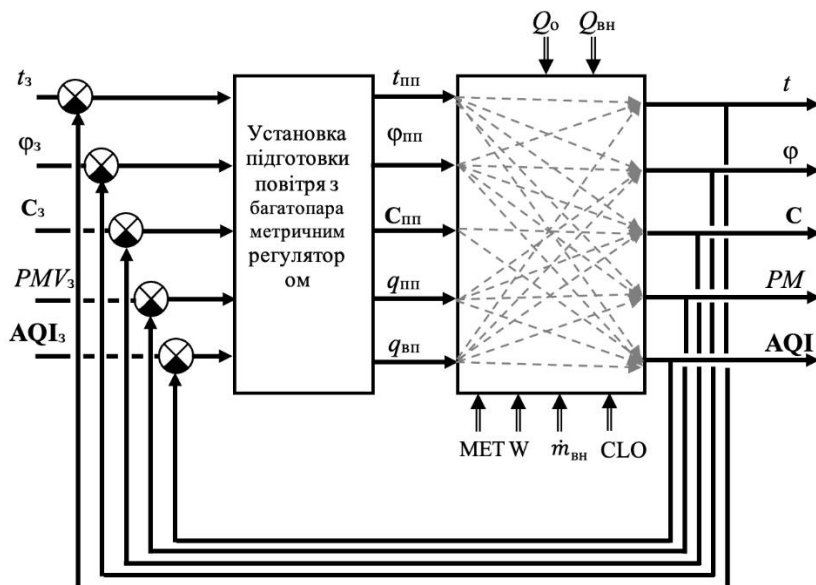


Рисунок 2 – Структурна схема багатопараметричної САК комфортністю та якістю повітря суднового приміщення:

$t_з$, $\phi_з$, $C_з$, $PMV_з$, $AQI_з$ – відповідно задані температура, відносна вологість, вектор максимально допустимих концентрацій забруднювачів, інтегральний показник комфортності, вектор максимально допустимих індексів якості повітря.

Згідно зі сформульованими вимогами до САК, задачу автоматичного керування можна інтерпретувати у вигляді задачі багатокритеріальної оптимізації: пошуку оптимального за Парето лексикографічного рішення:

$$\vec{x} = (t_{\text{пп}}, \varphi_{\text{пп}}, c_{1\text{пп}}, \dots, c_{n\text{пп}}, \varrho_{\text{пп}}, \varrho_{\text{вп}})$$

яке мінімізує цільові функції f_i згідно з їх пріоритетом, до того ж пріоритет цільової функції тим вище, чим нижче її індекс i :

$$\min_{lex} \{f_1(\vec{x}), \dots, f_{2n+3}(\vec{x})\},$$

$$f_i(\vec{x}) = \text{sgn}(c_i(\vec{x}) - c_{i_{\text{max}}}), i = 1, \dots, n,$$

$$f_{n+j}(\vec{x}) = \text{sgn}(AQI_j(\vec{x}) - AQI_{j_{\text{max}}}), j = 1, \dots, n,$$

$$f_{2n+1}(\vec{x}) = |\text{PMV}(\vec{x}) - \text{PMV}_3(\vec{x})|,$$

$$f_{2n+2}(\vec{x}) = |t(\vec{x}) - t_3(\vec{x})|,$$

$$f_{2n+3}(\vec{x}) = |\varphi(\vec{x}) - \varphi_3(\vec{x})|.$$

Універсальність сформульованої задачі автоматичного керування дозволяє адаптувати САК відповідно до міжнародних, державних та галузевих стандартів залежно від умов роботи судна та вантажів, що перевозяться.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Проведено формалізацію вимог до газового складу повітря, отримані аналітичні залежності. Розроблено математичну модель мікроклімату приміщення з урахуванням газового складу повітря та інтегральних показників його якості й комфортності.

Запропоновано альтернативний підхід до забезпечення комфортності помешкання з урахуванням показників якості повітря та структурну схему системи автоматичного керування. Сформульовано задачу автоматичного керування у вигляді задачі багатопараметричної оптимізації.

Отримані результати дослідження можуть застосовуватись при моделюванні динаміки показників комфортності та безпечності мікроклімату приміщень і синтезу систем автоматичного керування.

Практична реалізація систем автоматичного керування якістю та комфортністю повітря суднових приміщень потребує проведення наступних подальших наукових досліджень: верифікації моделі, деталізації структури САК, розробки алгоритму керування розподіленням повітря та процесами його фільтрації, створення прототипу багатопараметричного регулятора на базі мікропроцесорної техніки та дослідження його ефективності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Про затвердження Морської доктрини України на період до 2035 року : Постанова Кабінету Міністрів України від 07.10.2009 р. № 1307. *Верховна Рада України. Законодавство України*: вебсайт. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1307-2009-п>.

2. Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 30.05.2018 р. № 430-р. *Верховна Рада України. Законодавство України* : вебсайт. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-p>.
3. ДСП 7.7.4.-057-99 : Державні санітарні правила для морських суден України : Державна санітарно-епідеміологічна служба України, 1999. *Верховна Рада України. Законодавство України* : веб-сайт. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0057488-00>.
4. ДСП 7.7.4.048-99-2000 : Державні санітарні правила для річкових суден України: Державна санітарно-епідеміологічна служба України, 2000 *Верховна Рада України. Законодавство України* : вебсайт. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va048282-99>.
5. Про затвердження переліку професійних захворювань : Постанова Кабінету Міністрів України від 08.11.2000 р. № 1662. *Верховна Рада України. Законодавство України* : вебсайт. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1662-2000-p>.
6. He Zhang Ravi Srinivasan A Systematic Review of Air Quality Sensors, Guidelines, and Measurement Studies for Indoor Air Quality Management. MDPI, Sustainability Open Access *Journal He Zhang & Ravi Srinivasan*. October 2020. Vol. 12(21). P 1-38.
7. Regulation of Air Pollution: Australia. *Library of congress LAW* URL : <https://www.loc.gov/law/help/air-pollution/australia.php>
8. Criteria Air Pollutants. *United States Environmental Protection Agency* URL : <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants>
9. Limits for Air Contaminants. *United States department of labor* URL : <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.1000TABLEZ1>
10. List of MAK and BAT Values. Maximum Concentrations and Biological Tolerance Values at the Workplace Permanent Senate Commission for the Investigation of Health Hazards of Chemical Compounds in the Work Area URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9783527695539.oth1>
11. India: air Quality Standards. *Transport Policy.net* : <https://www.transportpolicy.net/standard/india-air-quality-standards/>
12. IAQ Management Act, Ministry of Environment. *Korea Legislation Research Institute* URL : https://elaw.klri.re.kr/eng_service/lawView.do?hseq=41231&lang=ENG
13. Canadian Ambient Air Quality Standards (CAAQS). *Canada»s Air*. URL : <https://www.ccme.ca/en/air-quality-report>
14. Air quality guidelines – global update 2005. *World Health Organization*. URL : <https://www.who.int/airpollution/publications/aqg2005/en/>
15. The NIOSH Occupational Exposure Banding Process for Chemical Risk Management : National Institute for Occupational Safety and Health. URL : <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2019-132/pdfs/2019-132.pdf>
16. ACGIH. TLVs and BEIs: Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices. In American Conference of Governmental Industrial Hygienists; ACGIH: Cincinnati, OH, USA, 2019
17. ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2016, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. URL : https://ashrae.iwrapper.com/ViewOnline/Standard_62.1-2016
18. Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality – the Air Quality Index (AQI). EPA. URL : <https://www3.epa.gov/airnow/aqi-technical-assistance-document-sept2018.pdf>
19. Bolton D. The Computation of Equivalent Potential Temperature. *Journals American Meteorological Society*. 1980. Vol.108, P.1046-1053 DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1980\)108<1046:TCOEPT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1980)108<1046:TCOEPT>2.0.CO;2)
20. Голиков В. А. Повышение эффективности и оптимизация режимов работы систем судового микроклимата: дис. на соиск. науч. степ. док-ра техн. наук: спец. 05.08.05 «Судовые энергетические установки». Миколаїв, 2000.

21. Chihui Zhu, Nianping Li Study on indoor air quality evaluation index based on comfort evaluation experiment, *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 205, P. 2246–2253.
22. Ходарина К. В. Обеспечение комфортных условий микроклимата обитаемых помещений морских судов: дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук: спец. 05.22.20 «Эксплуатация и ремонт средств транспорта», 2013.

REFERENCES

1. Pro zatverdzhennia Morskoi doktryny Ukrainy na period do 2035 roku : Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 07.10.2009 r. № 1307. Verkhovna rada Ukrainy. *Zakonodavstvo Ukrainy: veb-sait*. Retrived from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1307-2009-p>.
2. Pro skhvalennia Natsionalnoi transportnoi stratehii Ukrainy na period do 2030 roku : Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 30.05.2018 r. № 430-r. Verkhovna rada Ukrainy. *Zakonodavstvo Ukrainy : veb-sait*. Retrived from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-r>.
3. DSP 7.7.4.-057-99 : Derzhavni sanitarni pravyla dlia morskykh suden Ukrainy : Derzhavna sanitarno-epidemiolohichna sluzhba Ukrainy, 1999. Verkhovna rada Ukrainy. *Zakonodavstvo Ukrainy : veb-sait*. Retrived from <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0057488-00>.
4. DSP 7.7.4.048-99-2000 : Derzhavni sanitarni pravyla dlia richkovykh suden Ukrainy: Derzhavna sanitarno-epidemiolohichna sluzhba Ukrainy, 2000 Verkhovna rada Ukrainy. *Zakonodavstvo Ukrainy : veb-sait*. Retrived from <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va048282-99>.
5. Pro zatverdzhennia pereliku profesiinykh zakhvoriuvan : Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 08.11.2000 r. № 1662. Verkhovna rada Ukrainy. *Zakonodavstvo Ukrainy : veb-sait*. Retrived from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1662-2000-p>.
6. He Zhang Ravi Srinivasan A Systematic Review of Air Quality Sensors, Guidelines, and Measurement Studies for Indoor Air Quality Management. MDPI, Sustainability Open Access Journal He Zhang & Ravi Srinivasan. October 2020. Vol. 12(21). P 1-38.
7. . Regulation of Air Pollution: Australia. Library of congress LAW. Retrived from <https://www.loc.gov/law/help/air-pollution/australia.php>
8. Criteria Air Pollutants. United States Environmental Protection Agency. Retrived from <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants>
9. Limits for Air Contaminants. United States department of labort. Retrived from <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.1000TABLEZ1>
10. List of MAK and BAT Values. Maximum Concentrations and Biological Tolerance Values at the Workplace Permanent Senate Commission for the Investigation of Health Hazards of Chemical Compounds in the Work Area Retrived from <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9783527695539.oth1>
11. India: air Quality Standards. *Transport Policy.net*. Retrived from <https://www.transportpolicy.net/standard/india-air-quality-standards/>
12. IAQ Management Act, Ministry of Environment. Korea Legislation Research Institute Retrived from https://elaw.klri.re.kr/eng_service/lawView.do?hseq=41231&lang=ENG
13. Canadian Ambient Air Quality Standards (CAAQS). *Canada»s Air*. Retrived from <https://www.ccme.ca/en/air-quality-report>
14. Air quality guidelines – global update 2005. Word Health Organization. Retrived from <https://www.who.int/airpollution/publications/aqg2005/en/>
15. The NIOSH Occupational Exposure Banding Process for Chemical Risk Management : National Institute for Occupational Safety and Health. Retrived from <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2019-132/pdfs/2019-132.pdf>
16. ACGIH. TLVs and BEIs: Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices. In American Conference of Governmental Industrial Hygienists; ACGIH: Cincinnati, OH, USA, 2019

17. ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2016, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. Retrived from https://ashrae.iwrapper.com/ViewOnline/Standard_62.1-2016
18. Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality – the Air Quality Index (AQI). EPA. Retrived from <https://www3.epa.gov/airnow/aqi-technical-assistance-document-sept2018.pdf>
19. Bolton D. (1980). The Computation of Equivalent Potential Temperature. *Journals Americal Meteorological Society, Vol. 108*, 1046–1053. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1980\)108<1046:TCOEPT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1980)108<1046:TCOEPT>2.0.CO;2)
20. Golikov V. A. (2000). Povichshenie ehffektivnosti i optimizaciya rezhimov rabotih sistem sudovogo mikroklimata. *Doctors Thesis*. Mykolaiv.
21. Chihui Zhu & Nianping Li. (2017). Study on indoor air quality evaluation index based on comfort evaluation experiment. *Procedia Engineering, Vol. 205*, 2246–2253.
22. Khodarina K. V. (2013). Obespechenie komfortnihkh usloviyj mikroklimata obitaemihkh pometheniyj morskikh sudov. *Candidates Thesis*.

Метою дослідження є розробка структури системи автоматичного керування (САК) якістю і комфортністю повітря суднового приміщення та постановка задачі автоматичного керування. Проаналізовано сучасні методи оцінки безпеки газового складу повітря. У результаті встановлено, що створення систем автоматичного керування потребує застосування аналітичних показників безпеки при математичному моделюванні мікроклімату приміщення.

Проведено формалізацію вимог до газового складу повітря. Отримані аналітичні залежності включено в математичну модель мікроклімату приміщення.

Запропоновано альтернативний підхід до забезпечення комфортності помешкання з урахуванням показників якості повітря.

Стаття містить розробку математичної моделі мікроклімату приміщення з урахуванням газового складу повітря. Запропоновано структурну схему системи автоматичного керування і сформульовано задачу автоматичного керування у вигляді задачі багатопараметричної оптимізації. Визначено такі напрями подальших досліджень: верифікація моделі, деталізації структури САК і розробка алгоритму керування, створення прототипу на мікропроцесорній елементарній базі.

Отримані результати дослідження можуть застосовуватись при моделюванні динаміки показників комфортності та безпеки мікроклімату приміщень і створенні систем автоматичного керування.

Ключові слова: безпека мореплавства, якість повітря, газовий склад повітря, комфортність помешкання, багатопараметрична оптимізація.

Bily V.A., Holikov V.A. AUTOMATIC CONTROL OF INDOOR AIR QUALITY AND COMFORT OF SHIP PREMISES

The study is targeted at developing the structure of automatic control system (ACS) for indoor air quality and comfort management. Automatic control problem has been formalized as a multi-criteria optimization.

The modern methods of assessing the safety of the gas composition in the air have been analyzed. As follows from the analysis, it has been established, that the synthesis of automatic control system requires application of analytical safety indicators for accurate mathematical modeling of the ship premises microclimate.

The requirements for the gas composition in the air have been formalized. The obtained analytical dependences have been included into the mathematical model of the room microclimate.

An alternative approach for the air quality and comfort management has been developed.

The article contains the design of the mathematical model of the ship premises microclimate considering analytical functions for gas composition in the air and air quality. The structural scheme of the automatic control system has been proposed and the automatic control problem has been defined through the multi-criteria optimization.

The following areas for further research have been identified: verification of the model, particularization of the ACS structure and development of a control algorithm, creation of a prototype on a microprocessor elementary base.

The obtained results of the research can be applied when modeling the dynamics of indicators of comfort and safety of room microclimate as well as when creating automatic control systems.

Keywords: maritime safety, air quality, gas composition, comfort, multi-criteria optimization.

© Білій В. А., Голіков В. А.

Статтю прийнято
до редакції 24.05.21

УДК 355.588.2

ПІДХОДИ ДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТІЙКОГО УПРАВЛІННЯ СИСТЕМОЮ ПОШУКУ І РЯТУВАННЯ НА МОРЯХ У ПОЗАШТАТНИХ СИТУАЦІЯХ

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

Селіванов С. Є., д.т.н., професор Морського інституту післядипломної освіти імені контр-адмірала Ф. Ф. Ушакова, м. Херсон, ORCID: 0000-0001-8813-6276, e-mail: selivanstas1940@gmail.com

На сьогодні постає питання удосконалення служби пошуку і рятування на морі, а саме її оперативність, цілісність і безперервність. Здійснення операцій з пошуку і рятування суден і людей, що зазнали лиха на морських і океанських просторах, тривалий час було переважно завданням тих, хто опинився поблизу події морських суден і, звичайно, – «справою тих, хто потопав». Бурхливий розвиток науково-технічного прогресу, а саме розвиток новітніх нано-біо-інформаційно-когнітивних технологій (NBIC) позитивно вплинув на ситуацію і викликав потребу у розробці нових концепцій і створення у всесвітньому масштабі ефективної системи пошуку і рятування (САР від англійського SAR search and rescue). Україна створила єдину систему пошуку і рятування людей на морі (ЄСПРМ).

ЄСПРМ – це система органів, організацій і підприємств, які забезпечують організацію й здійснення операцій з пошуку і рятування людей, суден та інших матеріальних об'єктів під час лиха на морі, вона реалізує у сфері своєї діяльності пошук і рятування у певній морській зоні відповідальності. Світова практика проведення пошуково-рятувальних операцій на морі свідчить про низьку ефективність їх виконання в різних позаштатних ситуаціях, що виникають на морі. Значна частина аварій виникає через відмову бортового обладнання або двигунів силової установки; пробою корпусу судна при зіткненні із сторонніми механічними об'єктами; крім того, море являє собою середовище, яке піддається впливу різних стихійних факторів, тобто, небезпечне середовище, сполучене з безліччю ризиків. Систему пошуку і рятування на морі розглянемо на прикладі катастрофи т/х «Ванесса» в Азовському морі, що сталася 3 січня 2008 року, судно йшло під прапором Болгарії.

***Ключові слова:** стихійні лиха, основні чинники, стійке управління, позаштатні ситуації, швидкість вітру, координація, пошуково-рятувальна операція, реконфігурація керування.*

DOI: 10.33815/2313-4763.2021.1.24.019–028

Вступ. Державне управління – це цілеспрямований вплив на складну систему, до якої можна віднести єдину систему пошуку і рятування людей на морі. Керувати – це означає передбачити (враховувати майбутнє і розробляти програму дій).

Наведена складна система повинна бути стійкою до впливу дестабілізуювальних чинників різних за фізичною природою. На основі різних методів можливо здійснювати управління забезпеченням стійкості складної системи на різних етапах їх розробки:

- при обґрунтуванні і завданні вимог до стійкості;
- в ході експериментального відпрацювання;
- в процесі заданих вимог.

Забезпечення стійкості складних систем до впливу дестабілізуювальних чинників є трудомістким процесом, пов'язаним з урахуванням різного типу невизначеностей.

Внутрішні процеси, що викликають нестійкість процесів у системі рятування на морі, зумовлені двома видами керування: адміністративним і оперативним [1].

Фактори, що викликають нестійкість адміністративного управління, можна подати такими внутрішніми процесами: нечітке планування, погана організаційна робота, несумлінний добір, підготовка й розміщення кадрів, недостатнє фінансування, неадекватна оцінка системи пошуку і рятування людей на морі [2].

Знижують стійкість оперативного управління системою пошуку й рятування людей на морі також дестабілізуювальні фактори внутрішніх процесів, до яких можна віднести: нечіткі поточні й екстрені дії з підтримки операцій системи пошуку і рятування, неточні інформаційні моделі тощо [3–5].

Крім внутрішніх процесів, що викликають нестійкість у системі пошуку і рятування на морі викликають дестабілізуювальні дії зовнішні фактори, які умовно можна згрупувати так:

- вплив навколишнього середовища;
- вплив технічного стану судна, що зазнало лиха;
- вплив людського фактору.

Збуджувальні дії зовнішнього середовища мають різний характер і за цією ознакою їх можна розподілити на гідродинамічні сили водного середовища, аеродинамічні сили повітряного середовища, вплив течії та мілководдя тощо [6, 7].

Усі вони впливають на процес пошуку і рятування на морі, змінюючи потрібний для рятування час, що є одним з показників ефективності системи пошуку і рятування людей на морі.

Постановка задачі. Проблема забезпечення стійкості складних систем, тобто їхні здатності зберігати нормальне функціонування в процесі й після дестабілізуювальних факторів є тривалим, трудомістким, багатоітераційним процесом до досягнення необхідного результату або до досягнення заданих обмежень, пов'язаних з обліком різного типу невизначеностей і є досить актуальною [8].

По-перше, цей процес охоплює всі основні етапи життєвого циклу системи.

По-друге, визначення рівнів показників стійкості саме по собі є досить складним, чим, наприклад, визначення рівнів показників надійності.

По-третє, оцінка стійкості складної системи до впливу дестабілізуювальних внутрішніх і зовнішніх факторів вимагає великих знань у різних умовах.

Розглядаючи складну систему пошуку й рятування на морі зазначимо, що за організацію цілодобового моніторингу аварійних ситуацій на морі й координацію проведення пошуково-рятувальних операцій у межах морського пошуково-рятувального району України несе відповідальність державний морський рятувально-координаційний центр (ДМРКЦ, м. Одеса) і рятувально-координаційний підцентр (МРКПЦ, м. Маріуполь), берегові радіоцентри (БРЦ) і пост оповіщення (м. Бердянськ) у морському пошуково-рятувальному районі відповідальності України.

Практика проведення пошуково-рятувальних операцій показала низьку ефективність їх виконання в різних позаштатних ситуаціях, які виникають на морі.

Аналіз більшої частини аварій виникає через втрату остійності через зсув вантажу, при штормі, відмову бортового обладнання або двигунів силової установки; пробієни корпусу судна при зіткненні зі сторонніми механічними об'єктами; крім того, море являє собою середовище, яке піддається впливу різних стихійних факторів, тобто, небезпечне середовище, сполучене з безліччю ризиків.

Пошук нових компромісних рішень відбувається в напрямках скорочення часу прибуття рятувальних засобів на місце аварії; злагодженості дій служби пошуку і рятування на морі; збільшення щільності покриття зони відповідальності України сигналами берегових радіостанцій; оптимізації кількості та місць дислокації пошуково-рятувальних одиниць. Водночас розробки йдуть по шляху як удосконалення процедур виявлення суден, що зазнають лиха, так і процедур їх рятування, а також рятування людей. Суттєво стримує прогрес у цій галузі – необхідність у суттєвих додаткових витратах на підвищення щільності покриття зони відповідальності України, на придбання нових засобів пошуку і рятування та збільшення кількості пошуково-рятувальних підрозділів та особового їх складу.

Отже, для усунення різних дестабілізуювальних факторів при пошуку й рятуванні на морі, а тим самим підтримка стійкості системи необхідний досвід і знання.

Мета роботи зумовлює необхідність розв'язання наукової задачі, розроблення моделей і методів управління пошуково-рятувальними операціями на морі в умовах невизначеності.

Результати досліджень. Для розв'язку поставленого завдання розглянули аварійну морську подію, пов'язану із загибеллю членів екіпажу т/х «Ванесса» в Азовському морі, що сталася 3 січня 2008 року далі, (прапор Болгарії), і на цьому прикладі оцінили виконану роботу системою пошуку й рятування на морі.

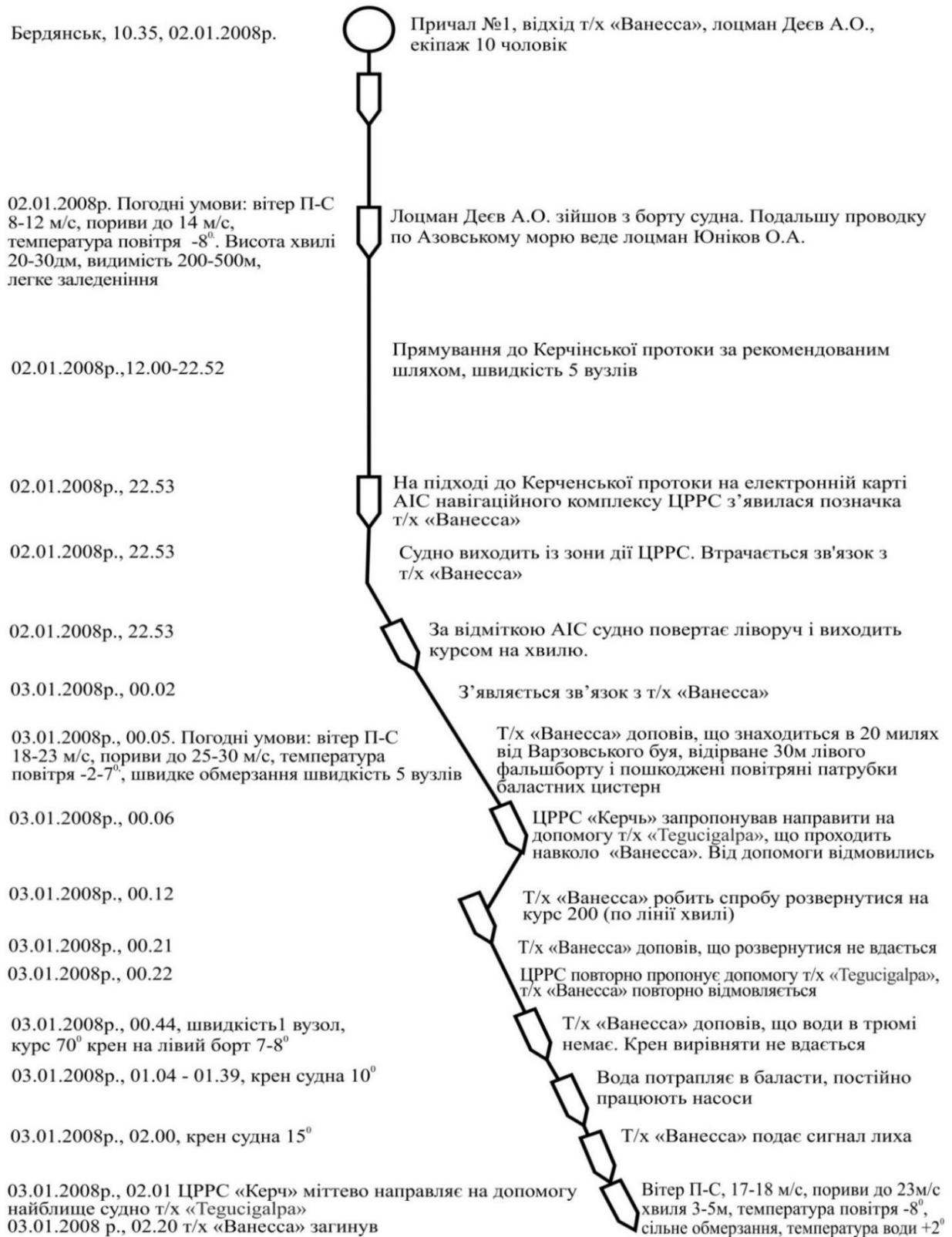


Рисунок 1 – Мапа подій загибелі т/х «Ванесса» в Азовському морі 03.01.2008 р. переносить уперед

Вивчені документи й речові докази аварійної події т/х «Ванесса», результати дослідження готовності, а також ефективність організації пошуково-рятувальних, техніко-технологічних заходів у цілому показало успішність проведення пошуково-рятувальної операції на морі в умовах жорстокого зимового шторму в Азовському морі. Це видно й з мапи подій (рис. 1).

Аналіз матеріалів розслідування загибелі членів екіпажу показав, що це залежало від наступних основних причин:

- швидкість вітру, хвилювання на місці загибелі судна розцінюються як жорстокий шторм при ураганній силі вітру, низьких температурах води й негативній температурі повітря з явищем зледеніння й характеризують гідрометеорологічну обстановку на місці загибелі судна як важку для мореплавання й жорстоку для життя й порятунку екіпажу при використанні будь-яких рятувальних засобів (шлюпки, боти, плоту й ін.);

- час, витрачений на встановлення зв'язку СПРМ з аварійним судном, обробки інформації, прийняття, рішення та поширення його по відповідних службах, транспортних засобів, що проходять повз аварійну зону та аварійного судна (з урахуванням втрат зв'язку);

- час на подолання відстані між рятувальним засобом та судном, що зазнало лиха, з урахуванням початкової відстані між ними та стану аварійного судна (час знаходження його на плаву);

- час допустимого перебування людини у воді з урахуванням стану моря, атмосфери та засобів подовження граничних умов перебування у воді;

- логіко-психологічний та психофізичний стан членів екіпажу (психологічний) шок, викликаний швидкоплинністю затоплення судна в штормових умовах за низької температури морського середовища і у нічний час і т. ін.);

- узгодженість дій людей служби ПРМ, членів екіпажу аварійного судна, судна-рятувальника та узгодженість дій між наведеними об'єктами та людьми.

Отже, з наведеного аналізу робимо висновок, що головним чинником, який визначає успішність і ефективність проведення пошуково-рятувальних операцій є час.

Так, якщо через якусь із наведених вище причин втрачена стійка керованість процесом рятування, то в цьому конкретному випадку стабілізуювальним функціоналом може слугувати час відновлення характеристик керованості [9]:

$$J_1 = \int_{t_2}^{t_1} dt = t_1 - t_{\text{від}}, \quad (1)$$

де $t_{\text{від}}$, t_1 – час втрати й відновлення керованості відповідно.

Вплив морських і океанічних течій характеризується тим, що вони спричиняють тільки плоскопаралельне знесення як судна-рятувальника, так і аварійного судна і не впливають на їхній обертальний рух, стійкість і керованість. Водночас, неправильні течії, зумовлені місцевими причинами, за напрямком не збігаються із загальним ходом води та можуть бути обертальними й обертально-поступальними. У цих випадках завдання стабілізації системи ускладнюються.

Питання стабілізації процесу управління рятуванням в умовах дії вітру. Вітер являє собою повітряний турбулентний потік, швидкість якого має пульсаційний характер і загалом формується із двох складових: середньої швидкості, що суттєво не впливає на стійкість управління процесом, і змінної складової, вплив якої істотний [10–12].

Залежно від висоти над рівнем моря у приводному шарі атмосфери середня швидкість вітру змінюється й описується залежністю [13–15]:

$$V = V_{h_0} + \frac{\partial V}{\partial(\lg h)} \lg\left(\frac{h}{h_0}\right), \quad (2)$$

де V_{h_0} – швидкість вітру на фіксованому рівні, висотою h_0 метрів.

Похідна від швидкості вітру за логарифмом висоти (логарифмічний вертикальний градієнт) є змінною величиною, що залежить від динамічної й термічної турбулентності.

Причиною дрейфу суден є вітер, що діє під кутом до діаметральної площини. У більшості випадків точка прикладення сили тиску вітру не збігається із центром маси судна, що є причиною виникнення моменту, який прагне розвернути судно за вектором вітру. Цей момент складається з моментом гідродинамічної сили, що виникає на корпусі судна при його русі з кутом дрейфу.

Наведені впливи на характер руху судна вимагають постійної корекції керівних дій.

Аналіз робіт [1, 16–18] показує, що проблему реконфігурації керування маневруванням судна, що рятує, та судна, що зазнає лиха, необхідно досліджувати за трьома напрямками:

- розробка методів координації дій служби пошуку і порятунку на морі за всіма трьома рівнями координації (координація пошуку і порятунку, координація пошуково-рятувальних операцій, координація на місці проведення операції);

- розробка методів автоматичного підлаштування; розробка концепції реконфігурації керування як у прямому ланцюзі, так і в ланцюзі зворотного зв'язку системи керування.

Запропоновано реконфігурацію керування рятуванням на морі як у прямому ланцюзі, так і в ланцюзі зворотного зв'язку автоматизованої системи керування, будувати її на принципах попереднього розрахунку коефіцієнтів зворотного зв'язку як для нормального функціонування системи, так і для кожної типової аварійної ситуації, і надалі використовувати їх у процесі виконання рятувальних робіт відносно конкретної аварійної ситуації. Водночас коефіцієнти зворотного зв'язку визначають у вигляді матричної функції аварійного стану в такому вигляді [19, 20]:

$$G(v) = \sum_{i=0}^{n_j} G_i(v_i^{(j)}), \quad (3)$$

де G_0, G_{ij} – коефіцієнти зворотного зв'язку справної системи і такої, що зазнала ij -ї аварійної ситуації;

$v_i^{(j)}$ – коефіцієнти, що характеризують ступінь втрати ефективності відповідного керівного органу.

Функція (1.3) будувалася так, щоб забезпечити стабілізацію набору з m дискретних лінійних моделей:

$$X_j(k+1) = A_j X_j(k) + B_j U_j(k) + \Omega_j(k), \quad x_j \in R^n, \quad (4)$$

$$Y_j(k) = C_j X_j(k) + V_j(k), \quad j=1, 2, \quad y_j \in R^p, \quad (5)$$

де $\Omega_j(k)$ – випадковий r -вимірний вектор дестабілізуювальних внутрішніх процесів і зовнішніх впливів; $V_j(k)$ – випадковий m -вимірний вектор гаусівських шумів вимірів.

$$M\{W_j(k) W_j^T(P)\} = W_j \delta_{KP}; \quad (6)$$

$$M\{W_j(k) W_j^T(P)\} = 0; \quad i \neq j; \quad (6)$$

$$M\{V_j(k) W_j^T(P)\} = V_j \delta_{KP}; \quad (6)$$

$$M\{V_i(k) W_j^T(P)\} = 0, \quad i \neq j, \quad (6)$$

де W – випадковий r -вимірний вектор гаусівських шумів збурень;

V – випадковий m -вимірний вектор гаусівських шумів вимірювань.

Умови мінімізації цільової функції, що визначає якість керування для типових аварійних моделей процесу пошуку і рятування на морі, наступні [8]:

$$J(u) = \int_t^{t_k} (Y^T Q Y + U^T G U) dt = \min \quad (7)$$

- несприятливі умови праці працівників служб рятування та членів екіпажів;
- недостатньо високий рівень професійної підготовки;
- порушення принципів і порядку виконання робіт у процесі рятувальних операцій тощо.

Аналіз наведених факторів, що впливають на наслідки управлінської діяльності суднових операторів (працівників служби рятування), можна досліджувати на основі динамічної моделі системи «СПРМ – судно – екіпаж – зовнішні умови – позаштатна ситуація».

Серед причин зниження безпеки мореплавання й аварійності домінує «людський фактор»: число аварій з вини екіпажів суден досягає за даними різних авторів 75–80 % [1, 6, 7]. «Проблема людського фактору полягає у відсутності достатніх знань про природні закони поведінки людини, про причинно-наслідкові зв'язки впливу на людину різних факторів, у відсутності визначення поняття «людський фактор», у складності й часом неможливості на сьогодні формалізації складових людського фактору, у відсутності методології кількісної оцінки й обліку впливу людського фактору на безпеку судна» [8]. Хоча зазначимо, що під людським фактором як звичайно розуміють сукупність особистих, медичних, біологічних, логіко-психологічних і психофізіологічних, професійних і соціальних факторів, які визначають умови експлуатації морських суден і обслуговування їх руху. Також це поняття поєднує безліч причин подій на морі, зумовлених діяльністю людини [21, 22].

Саме поняття «людський фактор» стосовно проблеми аварійності на флоті потребує подальшої верифікації й детального вивчення його складових, а національні й міжнародні системи пошуку й порятунку на море повинні кореспондуватися з особливостями поведінки й виживання людини у разі аварій суден у морі, а також передбачати максимальну взаємодію й злагоджену спільну роботу екіпажу, що зазнає нещастя судна з персоналом берегових рятувальних служб [13].

Розглянемо механізми виникнення причин помилкової дії системи пошуку й порятунку людей на морі, яке пов'язано з:

- неухильним підвищенням інтенсивності судноплавства;
- збільшенням розмірів і швидкості ходу суден, що визначає надзвичайно складні ситуації, які виникають на морі;
- низьким рівнем автоматизації;

– високими показниками віку суден – 25-30 і більше років становлять більш 20 % експлуатованого флоту, їх техніко-експлуатаційні характеристики безнадійно застаріли.

Дотепер службами ДМРКЦ, МРПЦ і БРС накопичений значний матеріал про характеристики людини-оператора в наведеній вище системі, що дає змогу виконувати динамічне моделювання її діяльності в різних аварійних ситуаціях. На підставі цих даних людина-оператор приблизно може бути «подана» у вигляді сукупності чотирьох ланок (рис. 2), які відображають характер зв'язків [23]:

- сприймаючі органи (рецептори);
- центральна нервова система (ЦНС);
- рухові органи (ефектори);
- ланцюги зворотного зв'язку (ЗЗ).

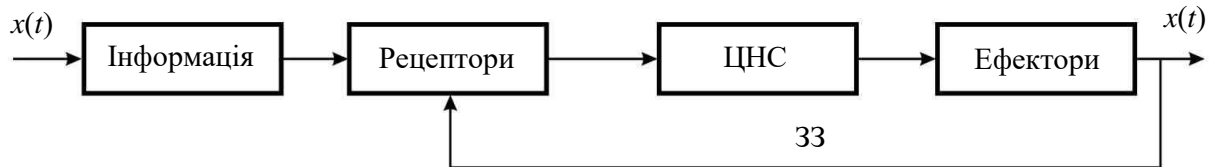


Рисунок 2 – Схема діяльності людини-оператора

Людина-оператор, присутня у контурі керування, в дисертаційній роботі врахована як динамічна система, здатна пристосовуватися до динамічних характеристик керованого об'єкта (служба порятунку на морі) і має властивість навчатися.

Ця динамічна система являє собою систему зі змінними параметрами й апостеріорною наближеною передатною функцією [24–26]:

$$w(p) = k \frac{(\alpha\tau_1\rho + 1)}{(\tau_1\rho + 1)(\tau_2\rho + 1)} \exp[-\tau\rho], \quad (8)$$

де k – коефіцієнт передачі; α – коефіцієнт сенсорної реакції оператора; ρ – оператор диференціювання; τ – час запізнювання відповідної реакції на сигнал що поступив; τ_1 – стала часу сенсорної реакції оператора; τ_2 – стала часу, що характеризує інерцію в моторній дії.

Висновки. Отже, із проведеного аналізу визначено вплив на стійкість управління системою пошуку і рятування на морі в позаштатних ситуаціях.

Підхід до забезпечення управління в системі пошуку й рятування на морі, на підставі аналізу реальних подій в Азовському морі, визначено основні чинники, які суттєво впливають на успішність проведення пошуково-рятувальної операції, звернено увагу на роль людського фактору в підвищенні ефективності системи пошуку і рятування на морі.

Отримані теоретичні результати будуть використані під час дослідження конкретних ситуацій на морі та дії у них людини-оператора (керівного персоналу СПРМ та членів екіпажів аварійного та рятувального суден).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Наставление по международному авиационному и морскому поиску и спасанию (ИАМСАР). Санкт-Петербург : ЦНИИМФ, 2013. Т. 1. 150 с., Т. 2. 552 с., Т. 3 270 с.
2. Грець І. С. Безопасность мореплавания поисково-спасательного флота / І. С. Грець. *Порты Украины*. 2012. № 1 (113). 163 с.
3. Бень А. П. Выход в исходную точку поиска в кратчайшее время при осуществлении поисково-спасательных операций / А. П. Бень, В. Н. Плющ. *Науковий вісник ХДМА*. 2010. Вип. № 1(2). С. 24–35.
4. Колмогоров А. Н. Основные понятия теории вероятностей. Москва, 1974. 120 с.
5. Ширяев А. Н. Вероятность / А. Н. Ширяев. Москва: МЦНМО, 2007. 968 с.

6. Сичкарев В. И. Использование в судовождении гидрометеорологической информации / В. И. Сичкарев. Новосибирск : ГАВТ, 1999. 175 с.
7. Вагущенко Л. Л. Системы автоматического управления движением судна / Л. Л. Вагущенко, Н. Н. Цымбал. Одесса : Ластар, 2002. 310 с.
8. Bakulin V. N., Malkov S. Yu., Goncharov V. V., Kovalev V. I. Management of ensuring the resilience of complex technical systems. Moscow : Fizmatlit, 2005. 304 p.
9. Казак В. М. Системні методи відновлення живучості літальних апаратів в особливих ситуаціях у польоті. Київ : Науковий друк, 2010. 284 с.
10. Дикий О. П. Моделі турбулентності повітряних потоків. *Містобудування та територіальне планування* : науково-технічний збірник. Київ : КНУБА, 2014. Вип. 54. С. 151–155.
11. Бызова Н. Л. Турбулентность в пограничном слое атмосферы / В. Н. Иванов, Е. К. Гаргер. Ленинград : Гидрометеиздат, 1989. 263 с.
12. Соловьев Ю. П. Предварительные результаты измерений атмосферной турбулентности над морем / Ю. П. Соловьев, В. А. Иванов. Крым: *Морской гидрофизический журнал*. 2007. С. 42–61.
13. Егоров Н. И. Морская гидрометеорология. Курс кораблевождения Т. VI / Н. И. Егоров, И. М. Безуглый, В. А. Снежинский. Ленинград, 1962. 524 с.
14. Савицкий Г. А. Ветровая нагрузка на сооружения. Москва: Стройиздат. 1972. 111 с.
15. Швень Н. И. Зависимость скорости ветра в приземном слое от защищенности ветроизмерительных приборов. *Техногенно-екологічна безпека та цивільний захист*. Київ, 2010. Вип. 1. С. 116–120.
16. Крымов И. С. Борьба за живучесть судна и спасательные средства. Москва : Транслит, 2011. 431 с.
17. Репетей В. Д. Поиск и спасания на море : учебно-практическое пособие / Репетей В. Д., Позолотин Л. А., Торский В. Г. Одесса : Астропринт, 2012. 195 с.
18. Дмитриев В. И. Информационные технологии обеспечения судоходства и их комплексное использование (e-NAVIGATION) : учебн. пособие / В. И. Дмитриев. Москва : Моркнига, 2013. 176 с.
19. Бруссард Р. Применение рассчитанных заранее законов управления в реконфигурируемой системе управления полетом / Р. Бруссард, Д. Д. Мердер, Н. Хальо, А. К. Каглайан. Пермь : ПНИПИ, 1989. Вип. № 2. С. 33–42.
20. Казак В. Н. Оценивание параметров математической модели беспилотного летательного аппарата / В. Н. Казак, И. А. Бояринов. *Проблеми експлуатації та надійності авіаційної техніки* : зб. наук. пр. Київ : КМУЦА, 1998. С. 67–71.
21. Ткачев В. Н. Влияние человеческого фактора на безопасность мореплавания : учебно-методическое пособие. Новороссийск : С легкой руки, 2009. 73 с.
22. Топалов В. П. Человеческий фактор в судоходстве / *Human factor in shipping*: уч.-практ. пособие / В. П. Топалов, В. Г. Торский. Одесса : Астропринт, 2015. 244 с.
23. Физиология человека / под ред. Г. И. Косицкого. Москва : ООО «Издательский дом Альянс», 2009. 544 с.
24. Казак В. Н. Оценитель для одного класса реконфигурируемых систем управления. *Вісник КМУЦА*. 1988. № 1. С. 231–236.
25. Казак В. Н. Дослідження надійності електропостачання світло-сигнальної системи аеродрому / В. Н. Казак, В. И. Нерет. *Вісник ТАУ*. Київ : Науковий центр, 2001. № 1. С. 44.
26. Методики оценки соответствия НЛГС-2. Гл. М3. Определение летных характеристик, устойчивости и управляемости самолета. Москва : Транспорт, 1977. 183 с.

REFERENCES

1. Nastavlenye po mezhdunarodnomu avyatsyonnomu y morskomu poysku y spasaniyu (YAMSAR). Sankt-Peterburh : TsNYYMF, 2013. T. 1. 150 s., T. 2. 552 s., T. 3 270 s.
2. Grets IS Safety of navigation of the search and rescue fleet / IS Grets. Ports of Ukraine, № 01 (113) 2012.
3. Ben A. P. Vыход v uskhodniyu tochku poyska v krachaishee vremia pry osushchestvlenyy poyskovo-spasatelnykh operatsyi / A. P. Ben, V. N. Pliushch. Naukovyi visnyk KhDMA. 2010. Vyp. № 1(2). S. 24 – 35.
4. Kolmogorov A. N. Osnovnye poniatiya teoryi veroiatnostei. Moskva, 1974. 120 s.
5. Shyriaev A. N. Veroiatnost / A. N. Shyriaev. Moskva: MTsNMO, 2007. 968 s.
6. Sychkarev V. Y. Yspolzovanye v sudovozhdenyy hydrometeorologicheskoi ynformatsyy / V. Y. Sychkarev. Norybysk : HAVT, 1999. 175 s.
7. Vahushchenko L. L. Systemy avtomaticheskoho upravleniya dvizhenyem sudna / L. L. Vahushchenko, N. N. Tsybal. Odessa: Lastar, 2002. 310 s.
8. Bakulin V. N., Malkov S. Yu., Honcharov V. V., Kovalev V. I. Management of ensurinh the resilientse of komplekh technical systems. M.: Fizmatlit. 2005. 304 p.
9. Kazak V. M. Systemni metody vidnovlennia zhyvuchosti litalnykh aparativ v osoblyvykh sytuatsiiakh u poloti. Kyiv: Naukovyi druk, 2010. 284 s.
10. Dykyi O. P. Modeli turbulentnosti povitrianykh potokiv. Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia: naukovo-tekhnichnyi zbirnyk. Kyiv: KNUBA, 2014. Vyp. 54. S. 151 – 155.
11. Vyzova N. L. Turbulentnost v pohranychnom sloe atmosfery / V. N. Yvanov, E. K. Harher. Lenynhrad: Hydrometeoyzdat, 1989. 263 s.
12. Solovev Yu. P. Predvartelnye rezultaty yzmerenyi atmosfernoii turbulentnosti nad morem / Yu. P. Solovev, V. A. Yvanov. Krym: Morskoii hydrofizycheskyi zhurnal. 2007. S. 42 – 61
13. Ehorov N. Y. Morskaia hmdrometeorologhiya. Kurs korablevozhdenyia T. VI / N. Y. Ehorov, Y. M. Bezuhlyi, V. A. Snezhynskiy. Lenynhrad. 1962. 524 s.
14. Savytskyi H. A. Vetrovaia nahruzka na sooruzhenyia. Moskva: Stroiyzdat. 1972. 11 s.
15. Shven N. Y. Zavysymost skorosty vetra v pryzemnom sloe ot zashchyschennosty vetroyzymeritelnykh pryborov. Tekhnohenno-ekologichna bezpeka ta tsyvilnyi zakhyst. Kyiv, 2010. Vyp. 1. S. 116 – 120.
16. Крымов Y. S. Borba za zhyvuchest sudna y spasatelnye sredstva. Moskva : TransLyt, 2011. 431 s.
17. Repetei V. D. Poysk y spasaniya na more : uchebno-praktycheskoe posobyie / Repetei V. D., Pozoloty L. A., Torskyi V. H. Odessa : Astroprynt, 2012. –195 s.
18. Dmytryev V. Y. Ynformatsyonnye tekhnologhiy obespechenyia sudokhodstva y ykh kompleksnoe yspolzovanye (e-NAVIGATION) : uchebn. posobyie / V. Y. Dmytryev. Moskva : Morknyha, 2013. 176 s.
19. Brussard R. Prymenenye rasschytnnykh zaranee zakonov upravleniya v rekonfihuryruemoi systeme upravleniya poletom / R. Brussard, D. D. Merder, N. Khalo, A. K. Kahlaian. Perm: PNYPY, 1989. Vyp. № 2. S. 33 – 42.
20. Kazak V. N. Otsenyvanye parametrov matematycheskoi modely bespylotnoho letatelnoho apparata / V. N. Kazak, Y. A. Boiarynov. Problemy ekspluatatsii ta nadiinosti aviatsiinoi tekhniky: zb. nauk. pr. Kyiv: KMUTsA, 1998. S. 67 – 71.
21. Tkachev V. N. Vlyianyie chelovecheskoho faktora na bezopasnost moreplavaniya: uchebno-metodycheskoe posobyie. Novorossyisk: yzd. «S lehkoi ruki», 2009. 73 s.
22. Topalov V. P. Chelovecheskyi faktor v sudokhodstve / Human factor in slupping: uch.-prakt. posobyie / V. P. Topalov, V. H. Torskyi. Odessa: Astroprynt, 2015. 244 s.
23. Fyziologhiya cheloveka / pod red. H. Y. Kosytskoho. Moskva : OOO «Yzdatelskyi dom Alians», 2009. 544 s.

24. Kazak V. N. Otsenyvatel dlia odnogo klassa rekonfyhuryruemykh system upravleniya. Visnyk KMUTsA, 1988. № 1.S. 231 – 236.

25. Kazak V. N. Doslidzhennia nadiinosti elektropostachannia svitlo-syhnalnoi systemy aerodromu / V. N. Kazak, V. Y. Neret. Visnyk TAU, Kyiv: Naukovyi Tsentr, 2001. № 1, 44s

26. Metodyky otsenky sootvetstviya NLHS-2. НІ. МЗ. Opredelenye letnykh kharakterystyk, ustoichyvosty y upravliaemosty samoleta. М.: Transport, 1977. 183 s.

Годованюк С. П., Селиванов С. Е. ПОДХОДЫ К ОБЕСПЕЧЕНИЮ СТОЙКОГО УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ ПОИСКА И СПАСАНИЯ НА МОРЕ В НЕШТАТНЫХ СИТУАЦИЯХ

На сегодня стоит вопрос усовершенствования службы поиска и спасания на море, а именно ее оперативность, целостность и непрерывность. Осуществление операций по поиску и спасанию судов и людей, которые терпят бедствие на морских и океанских пространствах, продолжительное время было преимущественно задачи тех, кто оказался близ события морских судов и, конечно, – «делом самых тонущих». Бурное развитие научно-технического прогресса, а именно развитие новейших нано-био-информационно-когнитивных технологий (NBIC) положительно повлиял на ситуацию и вызвал потребность в разработке новых концепции и создания во всемирном масштабе эффективной системы поиска и спасания (САР от английского SAR search and rescue). Украина создала единую систему поиска и спасание людей на море (ЕСПСМ). ЕСПСМ – это система органов, организаций и предприятий, которые обеспечивают организацию и осуществление операций по поиску и спасания людей, судов и других материальных объектов во время бедствия на море, она реализует в сфере своей деятельности поиск и спасания в определенной морской зоне ответственности. Мировая практика проведения поисково-спасательных операций на море свидетельствует о низкой эффективности их выполнения в разных нештатных ситуациях, которые возникают на море. Значительная часть аварий возникает через отказ бортового оборудования или двигателей силовой установки; пробой корпуса судна при столкновении с посторонними механическими объектами; кроме того, море представляет собой среду, которая подвергается влиянию разных стихийных факторов, то есть, опасная среда, соединенная с множеством рисков. Систему поиска и спасания на море рассмотрим на примере катастрофы т/х «Ванесса» в Азовском море, которая произошла 3 января 2008 года, судно шло под флагом Болгарии.

Ключевые слова: стихийные бедствия, основные факторы, стойкое управление, нештатные ситуации, скорость ветра, координация, поисково-спасательная операция, реконфигурации управления, когнитивные технологии.

Godovanyuk S. P., Selivanov S. E. APPROACHES FOR THE SUSTAINABLE MANAGEMENT OF A SYSTEM FOR SEARCH AND RESCUE AT SEA IN STATES OF EMERGENCY

There is now a question of improving the search and rescue service at sea, namely its efficiency, integrity and continuity. For a long time, carrying out search and rescue operations for ships and people in distress in sea and ocean spaces was primarily the task of those who found themselves in close proximity to a vessel suffering from emergency and, of course, “You are on your own. Sink or swim”. The rapid development of scientific and technological progress, namely the development of the latest nano-bio-information-cognitive technologies (NBIC), has had a positive impact on the situation and has created a need for new concepts development and for an effective search and rescue system worldwide (SAR). Ukraine has established the Unified System for Search and Rescue of People at sea. The Unified System for Search and Rescue of People at sea is a system of bodies, organizations and enterprises that ensure the organization and implementation of search and rescue operations of people, ships and other material objects in the course of distress at sea; it carries out search and rescue activities in a certain maritime area of responsibility. The worldwide practice of search and rescue operations is indicative of their poor performance in different contingencies that arise at sea. A significant part of accidents occurs through the failure of on-board equipment or ship power plant; rupture of the ship’s hull in the event of collision with foreign mechanical objects; in addition, the sea is an environment that is a subject to various natural factors, that is, a dangerous environment associated with a lot of risks. Let us consider the search and rescue at sea on the example of the disaster of the m / v Vanessa in the Sea of Azov, which took place on January 3, 2008, the ship was sailing under the flag of Bulgaria.

Keywords: natural disasters, main factors, sustainable management, emergency situations, wind speed, coordination, search and rescue operation, management reconfiguration, cognitive technologies.

© Годованюк С. П., Селиванов С. Е.

Статтю прийнято
до редакції 11.05.21

UDC 629.05: 656.61:004.942

CONTROL REDUNDANCY AS A QUANTITATIVE MEASURE OF MANEUVERABILITY

Zinchenko S. M., PhD, associate professor of ship handling department, head of electronic simulators laboratory, Kherson state maritime academy, e-mail: srz56@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5012-5029;

Nosov P. S., PhD, associate professor, Kherson state maritime academy, e-mail: pason@ukr.net, ORCID: 0000-0002-5067-9766;

Popovych I. S., Dr. Sc., full professor of the department of psychology, Kherson State University, e-mail: pason@ukr.net, ORCID: 0000-0002-1663-111X

DOI: 10.33815/2313-4763.2021.1.24.029–037

The purpose of the article is to determine the criterion of control redundancy and calculate its value for various types of vessels and navigation modes. A brief review was carried out and it was concluded that redundancy controls are mostly used only as a backup to improve reliability, but not as a means of optimizing control. The dependence of the vessel's maneuvering capabilities on the value of this criterion and its importance in the classification is shown. A formula for calculating control redundancy is proposed, and control redundancy values are calculated for vessels with different control schemes.

Keywords: sea transport, automatic control, redundant control, optimal control, active control means, control scheme.

Introduction. Sea transport for various purposes and operating conditions is classified according to the following main characteristics [1]:

- the way of movement (self-propelled and non-self-propelled);
- the method of movement (above water, on the surface of water or under water);
- the condition of the body (with a rigid, elastic, inflatable body);
- the main body material (steel, light metal alloys, plastic, wooden, reinforced concrete, elastic materials (nylon) and composite);
- the area of navigation (sea, raids and coastal navigation, inland and mixed navigation);
- the nature of the main power plant, which sets the vessel in motion (steamboats, motor ships; electric turbo-diesel motor ships, gas ducts);
- the type of propulsion (screw, wing propeller, water-jet, paddle wheels, sailing; oars, etc.);
- for special purposes (civilian ships and ships of the Navy).

The above list does not contain one of the important paragraphs. It is control redundancy, which is being discussed in this article.

Vessel's control redundancy is currently only considered in terms of reliability. So, in the document [2], section 8, part XV «Automation» for dynamic positioning systems, it is said that redundancy of a dynamic positioning system is a duplication or multiple reservation of its elements, where a complex consisting of an electric power supply system and propulsive mechanisms with their individual control systems, is operated under the control of a computer system in such a way, that the failure of individual control systems of individual propulsive mechanisms or electronic cops of the electric power supply system does not affect the task of holding the vessel above the positioning point. Depending on the degree of reservation, one of the signs DYNPOS – 1, DYNPOS – 2 or DYNPOS – 3 is added to the main symbol of the vessel class. At the same time, DYNPOS – 1 defines the System with minimal redundancy, when the loss of the position of the vessel above the positioning point can occur in case of a single failure. DYNPOS – 2 provides that the System must have a redundancy that ensures the vessel is kept above the positioning point in case of a single failure in any active element of the system (failure in any passive element is excluded due to the availability of appropriate protection). DYNPOS – 3 provides that the System must have a redundancy that ensures the vessel is kept above the positioning point in case of a single failure of elements in the following variants:

- failure of any active and passive elements located in different watertight compartments;
- failure of active and passive elements located in any of watertight compartments as a result of flooding or fire;
- failure of active and passive elements located in any of fire zones as a result of fire or explosion.

At the same time, it has also been shown in [3–4] that the use of control redundancy makes it possible to increase the maneuverability of the vessel and also to optimize the vessel's movement in energy consumption under external influences. This can only be achieved if automatic control systems are used. The control of the vessel with the help of a command on the bridge is mainly carried out intuitively, without accurate mathematical calculation. The behavior of a person in a team when working on a bridge is considered in more detail, for example, in articles [5-11], and some psychological aspects of behavior in articles [12, 13]. In articles [14–21] various active control systems (ACS) have been used on vessels to increase their maneuverability. However, in these and other works, maneuvering capabilities have been evaluated qualitatively. The famous scientist D.I. Mendeleev in his work «Fundamentals of Metrology» mentioned that science begins where measurements are begun. Therefore, the introduction of numerical evaluation criterion and assessment of the maneuverability of vessels by this criterion is an urgent scientific and technical task.

The purpose of the article is to determine the criterion of control redundancy and calculate its value for various types of vessels and navigation modes.

Main research material. As a criterion for redundancy in ship's control, the difference between the number of available controls and the number of degrees of freedom to be controlled is accepted. This criterion can be used to assess the maneuverability of the vessel as well as the ability to adapt control. The degree of control redundancy is determined by the following formula $IU = NU - NS$, where NU is the number of controls, NS is the number of degrees of freedom to be controlled. The vessel has three degrees of freedom – longitudinal, lateral movement and yaw angle. The number of controls depends on the number of control devices on this ship (aft steering, bow and stern thrusters, azipods, engines, etc.). At the transition and in maneuvering mode, a different number of control devices is used. So, in the maneuvering mode, bow and stern thrusters can be additionally used, the engines operating at different speeds in order to create additional control moments and increase maneuverability. Therefore, the degree of redundancy for control in maneuvering mode is always higher than at the transition.

The table 1 shows the IU redundancy data obtained for some types of vessels of the Navi Trainer 5000 simulator [22, 23]. The first IU value is calculated for the transition mode, and the second IU value is calculated for the maneuvering mode.


Results of research. The most common control scheme, which covers about 85% of all vessels, is represented by the vessels Bulk carrier 6 (Dis.44081t) and Crude Oil Tanker 4 (group 1 in table 1). The characteristics of Bulk carrier 6 (Dis.44081t) are given in table 2.

Table 1 – IU redundancy data obtained for some types of vessels

Gr.	Type of vessel	Type of engine	Propulsion type	Bow thruster	Stern thruster	IU
1.	Bulk carrier 6 (Dis.44081t)	low speed diesel (1x8002кВт)	FPP	not present	not present	-1=2-3 -1=2-3
	Crude Oil Tanker 4	low speed diesel (1x13560кВт)	FPP	not present	not present	-1=2-3 -1=2-3
2.	Car Carrier 2 (Dis.19587t)	low speed diesel (1x11695кВт)	FPP	present	not present	-1=2-3 0=3-3
	MSC container ship 1 (Dis.32025t)	low speed diesel (1x15890кВт)	FPP	present	not present	-1=2-3 0=3-3
3.	Shuttle tanker 1 (Dis.160529t)	low speed diesel (1x17400кВт)	CPP	present	not present	-1=2-3 0=3-3
4.	Container ship 22 (Dis. 191000t)	low speed diesel (1x71785кВт)	FPP	present	present	-1=2-3 1=4-3
5.	River-sea ship 3 «Sormovsky»	low speed diesel (2x640кВт)	FPP	present	present	-1=2-3 1=4-3
6.	Ro-Ro passenger ferry 13	medium speed diesel (2x4000кВт)	FPP	present	not present	0=3-3 1=4-3
7.	OSV 9 (Dis.5291t)	medium speed diesel (2x6166кВт)	CPP	present	present	0=3-3 2=5-3
8.	Passenger cruise ship 10.	electric motor (2x17600 кВт) Azipode	FPP	present	present	1=5-3 3=6-3
9.	Semisubmersible 1AH, Semisubmersible 1AH Common, Semisubmersible 1AH Navis, Semisubmersible 1AH Common DP, Semisubmersible 1AH Navis DP.	high speed diesel (4x4100кВт) Steering column	FPP	not present	not present	5=8-3 5=8-3

Table 2 – Characteristics of the Bulk carrier 6 (Dis.44081t)

<i>Bulk carrier 6 (Dis.44081t)</i>	
Engine's type	low-speed diesel (1x8002) kwt
Propulsion type	FPP
Bow thruster	not present
Stern thruster	not present
Displacement, t	44081,1
Maximum speed, kn.	16,4
Length, m	225
Width, m	32,3
Bow/Stern draft, m	7,4/8



These vessels are equipped with one engine, Fixed Pitch Propeller (FPP) and one stern steering. Since the FPP is not controllable, the number of controls in this scheme is $NU = 2$ (engine revolutions + stern steering), the number of degrees of freedom to be controlled is 3. The degree of redundancy is $IU = 2 - 3 = - 1$. Since there are no other control devices on these vessels, this degree of control redundancy will be in transition and in maneuvering mode. Since the stern steering in this control scheme is used both to work out lateral displacements and to work out angular deviations, it is impossible to ensure the vessel moves along a route with a zero drift angle, which means that there will be additional resistance from the drift angle and additional fuel consumption, i.e. this scheme control is not optimal in terms of energy consumption.

Group 2 of table 1 is represented by the Car Carrier 2 (Dis. 19587t) and the MSC container ship 1 (Dis. 32025t). The characteristics of MSC container ship 1 (Dis. 32025t) are given in table 3. The vessels are equipped with one engine, FPP, stern steering and bow thruster. In maneuvering mode, all available control devices can be used, i.e., the number of controls $NU = 3$ (engine revolutions + stern steering + bow thruster), and the degree of redundancy in control is $IU = 3 - 3 = 0$. At the transition, the bow thruster is not used, therefore the number of controls is $NU = 2$ (engine revolutions + stern steering), and the degree of redundancy in control is $IU = 2 - 3 = -1$. Vessels with this control circuit at the transition are similar to the vessels of group 1, i.e. the control circuit is not optimal in terms of energy consumption.

Table 3 – The characteristics of MSC container ship 1 (Dis. 32025t)

<i>MSC container ship 1 (Dis. 32025t)</i>	
Engine's type	low-speed diesel (1x15890) kwt
Propulsion type	FPP
Bow thruster	present
Stern thruster	not present
Displacement, t	32025
Maximum speed, kn.	19,4
Length, m	203,6
Width, m	25,4
Bow/Stern draft, m	9,6/10




In maneuverable mode, the control system of such vessels can provide movement along a route with a zero drift angle, which means less energy consumption.

Group 3 of the table 1 is represented by Shuttle tanker 1 (Dis.160529t). The characteristics of the vessel are given in table 4.

Table 4 – The characteristics of the Shuttle tanker 1 (Dis.160529t)

<i>Shuttle tanker 1 (Dis.160529t)</i>	
Engine's type	low-speed diesel (1x17400) kwt
Propulsion type	CPP
Bow thruster	present
Stern thruster	not present
Displacement, t	160529
Maximum speed, kn.	17
Length, m	277,4
Width, m	46
Bow/Stern draft, m	15,9/15,9




The vessel is equipped with one engine, Controlled Pitch Propeller (CPP), stern steering and bow thruster. CPP allows to change the screw force without changing the engine revolutions, but change of screw pitch and engine revolutions lead to a change in screw force and parameters of longitudinal movement and cannot be considered as two independent controls. In the

maneuvering mode, all available controls can be used, i.e. the number of controls $NU = 3$ (engine revolutions and CPP + stern steering + bow thruster), and the degree of redundancy is $IU = 3 - 3 = 0$. At the transition, the bow thruster is not used, therefore, the number of controls is $NU = 2$ and the degree of redundancy is $IU = -1$.

Group 4 of table 1 is represented by Container ship 22 (Dis. 191000t). The characteristics of the vessel are given in table 5. The vessel is equipped with one engine, FPP, stern steering, bow and stern thrusters. In the maneuvering mode, all available control devices can be used, i.e. the number of controls $NU = 4$ (engine revolutions + stern steering + bow thruster + stern thruster), and the degree of control redundancy is $IU = 4 - 3 = 1$, i.e. in maneuvering mode such control schemes can provide optimal control with a zero drift angle. At the transition, bow and stern thrusters are not used, therefore, the number of controls is $NU = 2$ (engine revolutions + stern steering), and the degree of redundancy is $IU = 2 - 3 = -1$, i.e. the control scheme is similar to the vessels of group 1.

Table 5 – The characteristics of the Container ship 22 (Dis. 191000t)


<i>Container ship 22 (Dis. 191000t)</i>	
Engine's type	low-speed diesel (1x71785) kwt
Propulsion type	FPP
Bow thruster	present
Stern thruster	present
Displacement, t	191000
Maximum speed, kn.	25,5
Length, m	393
Width, m	56
Bow/Stern draft, m	13,7/13,7



Group 5 of the table 1 is represented by the vessel River-sea «Sormovsky». The characteristics of the vessel are given in table 6.

Table 6 – The characteristics of River-sea «Sormovsky»

<i>River-sea "Sormovsky"</i>	
Engine's type	low-speed diesel (2x640) kwt
Propulsion type	FPP
Bow thruster	present
Stern thruster	not present
Displacement, t	4514
Maximum speed, kn.	10,3
Length, m	119,2
Width, m	13,4
Bow/Stern draft, m	3,4/3,6



The vessel is equipped with two engines, FPP, stern steering and bow thruster. In maneuvering mode, all available control devices can be used, i.e. the number of controls is $NU = 4$ (engine revolutions 1 + engine revolutions 2 + stern steering + bow thruster), and the degree of redundancy in control is $IU = 4 - 3 = 1$. At the transition, both engines operate at the same revolutions, and the bow thruster is not used, so the number of controls is $NU = 2$ (engine revolutions + stern steering), and the degree of redundancy $IU = 2 - 3 = -1$.


Group 6 of table 1 is represented by the Ro-Ro passenger ferry. The characteristics of the vessel are given in table 7.

The vessel is equipped with two engines, CPP, a stern steering and a bow thruster. In maneuvering mode, all available control devices can be used, i.e. the number of controls $NU = 4$

(engine revolutions 1 and CPP + engine revolutions 2 and CPP + stern steering + bow thruster), and the degree of control redundancy is $IU = 4 - 3 = 1$. At the transition, both engines operate at the same revolutions, and the bow thruster is not used, so the number of controls is $NU = 3$ (engine revolutions and CPP + stern steering), and the degree of redundancy is $IU = 3 - 3 = 0$.

Table 7 – The characteristics of Ro-Ro passenger ferry

<i>Ro-Ro passenger ferry</i>	
Engine's type	medium speed diesel (2x4000) kwt
Propulsion type	CPP
Bow thruster	present
Stern thruster	not present
Displacement, t	7796,8
Maximum speed, kn.	20,5
Length, m	125
Width, m	23,4
Bow/Stern draft, m	5,3/5,3



Group 7 of the table 1 is presented by OSV 9 (Dis.5291t). The characteristics of the vessel are given in table 8.

Table 8 – The characteristics of OSV 9 (Dis.5291t)

<i>OSV 9 (Dis.5291t)</i>	
Engine's type	medium speed diesel (2x6166) kwt
Propulsion type	CPP
Bow thruster	present
Stern thruster	present
Displacement, t	5291
Maximum speed, kn.	16,2
Length, m	80,4
Width, m	18
Bow/Stern draft, m	6,6/6,6




The vessel is equipped with two engines, CPP, stern steering, bow and stern thrusters. In maneuvering mode, all available control devices can be used, i.e. the number of controls $NU = 5$ (engine revolutions 1 and CPP + engine revolutions 2 and CPP + stern steering + bow thruster + + stern thruster), and the degree of control redundancy is $IU = 5 - 3 = 2$. At the transition, both engines operate at the same revolutions, the bow and stern thrusters are not used, therefore the number of controls is $NU = 3$ (engine revolutions and CPP + stern steering), and the degree of control redundancy is $IU = 3 - 3 = 0$.

Group 8 of table 1 is represented by Passenger cruise ship 10. The characteristics of the vessel are given in table 9.

Table 9 – The characteristics of Passenger cruise ship 10

<i>Passenger cruise ship 10</i>	
Engine's type	electric motor (2x17600) kwt
Propulsion type	Azipod, FPP
Bow thruster	present
Stern thruster	present
Displacement, t	44000
Maximum speed, kn.	24
Length, m	294
Width, m	37,9
Bow/Stern draft, m	8/8




The vessel is equipped with two azipods with FPP, bow and stern thrusters. In maneuvering mode, all available control devices can be used, i.e., the number of controls is $NU = 6$ (2 azipode deflection angles + 2 engine revolutions + bow thruster + stern thruster), and the degree of control redundancy is $IU = 6 - 3 = 3$. The bow thrusters are not used at the transition, therefore the number of controls is $NU = 4$ (2 azipode deflection angles + 2 engine revolutions), and the degree of control redundancy is $IU = 4 - 3 = 1$.

Group 9 of table 1 is represented by the platforms Semisubmersible 1, Semisubmersible 1AH, Semisubmersible 1AH Common, Semisubmersible 1AH Navis, Semisubmersible 1AH Common DP, Semisubmersible 1AH Navis DP. The characteristics of the Semisubmersible 1 platform are given in table 10.

Table 10 – The characteristics of Semisubmersible 1 platform

<i>Semisubmersible 1 platform</i>	
Engine's type	high-speed diesel (4x4100) kwt
Propulsion type	steering column, FPP
Bow thruster	not present
Stern thruster	not present
Displacement, t	35700
Maximum speed, km	10
Length, m	129,8
Width, m	79,6
Bow/Stern draft, m	10/10



Platforms are equipped with four azipods with FPP.

In maneuvering mode, all available control devices can be used, i.e. the number of controls is $NU = 8$ (4 deflection angles of steering column + 4 screw force), and the degree of control redundancy is $IU = 8 - 3 = 5$. The transition uses the same controls as in maneuvering mode.

Conclusions. As can be seen from the obtained results, most of the vessels have the control redundancy $IU = -1$. This means that the control systems of such vessels cannot ensure the simultaneous development of all control parameters (lateral displacement and yaw angle). In this case, it is necessary to organize double-circuit control. First, the lateral deviation to be worked out, then the angular deviation. When moving along the route, vessels with such control scheme have a drift angle that causes additional resistance to movement and additional fuel consumption. The control of such vessels is not optimal in terms of energy consumption. Vessels with a control redundancy $IU = 0$ have sufficient control. The control systems of such vessels make it possible to keep the vessel on route with a zero drift angle, including when in the presence of external disturbances. Control redundancy $IU > 0$ means that control systems of such vessels make it possible not only to keep the vessel on route with a zero drift angle, including when in the presence of external disturbances, but also to optimize controls within the system itself.

REFERENCES

1. Classification of ships according to common basic characteristics. *MIL.PRESS FLOT* Retrieved from <https://flot.com/publications/books/shelf/chainikov/3.htm>.
2. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part XV. *Automation: Maritime Register of Shipping*. St. Petersburg, 2017. 48 p.
3. Zinchenko S. M., Nosov P. S., Mamenko P. P., Grosheva O. O., Meteichuk V. M. Automatic control of vessel's movement under external conditions. *Naukovyj visnyk HDMA*. 2019. № 2 (21). P.10–15. DOI: 10.33815/2313-4763.2019.2.21.010-015
4. Zinchenko S. N., Grosheva O.O., Matejchuk V. M., Mamenko P. P., Pivovarov L. A. Systema vodinnja po marshrutu. Patent na vynahid №123235 vid 03.03.2021.
5. Apostol - Mates, R., Barbu, A. Human error – the main factor in marine accidents. *Naval Academy Scientific Bulletin*. 2016. № 19 (2). DOI: 10.21279/1454-864X-16-12-068.
6. The Relation between Human Error and Marine Industry. *Marine in sight*. Retrieved from <https://www.marineinsight.com/marine-safety/the-relation-between-human-error-and-marine-industry/>
7. Sotiralis P., Ventikos, N. P., Hamann, R., Golyshev, P., Teixeira, A. P. Incorporation of human factors into ship collision risk models focusing on human centered design aspects. *Reliability Engineering & System Safety*. 2016. Vol. 156. P. 210–227. DOI: 10.1016/j.ress.2016.08.007
8. Luo M., Shin, S.: Half-century research developments in maritime accidents: Future directions. *Accident Analysis & Prevention* 123. 2019 P. 448–460. DOI: 10.1016/j.aap.2016.04.010
9. Nosov P. S., Zinchenko S. M., Ben A. P., Nahrybelnyi Ya. A., Dudchenko O. M. Models of decision making by a navigator under implicit agreements with COLREG rules. *Naukovyj visnyk HDMA*. 2019. № 1 (20). DOI: 10.33815/2313-4763.2019.1.20.031-039
10. Nosov P., Palamarchuk I., Zinchenko S., Popovych I., Nahrybelnyi Y., Nosova H. Development of means for experimental identification of navigator attention in ergatic systems of maritime transport. *Bulletin of University of Karaganda. Technical Physics*. 2020. № 1(97). P. 58–69. DOI: 10.31489/2020Ph1/58-69
11. Nosov P. S., Cherniavskiy V. V., Zinchenko S. M., Popovych I. S., Nahrybelnyi Ya. A., Nosova H.V. Identification of marine emergency response of electronic navigation operator . *Radio Electronics, Computer Science. Control*, 2021. № 1. P. 208–223. DOI:10.15588/1607-3274-2021-1-20
12. Popovych I., Blynova O., Nosov P., Zinchenko S., Kononenko O. Psychological factors of competitiveness of the women's youth handball team. *Journal of Physical Education and Sport (JPES)*. 2021. Vol. 21 (1). P. 227–235. DOI: 10.7752/jpes.2021.01030
13. Popovych I. S., Cherniavskiy V. V., Dudchenko S. V., Zinchenko S. M., Nosov P. S., Yevdokimova O. O., Burak O. O., Mateichuk V. M. Experimental Research of Effective «The Ship's Captain and the Pilot» Interaction Formation by Means of Training Technologies. *Revista Espacios*. 2020. № 41 (11). P. 30. <http://www.revistaespacios.com/a20v41n11/20411130.html>
14. Vagushhenko L. L. Systemy avtomatychnogo keruvannja ruhom sudna. Odesa : Feniks, 2007. 328 s.
15. Upravlenye sudnom. Uchebnik dlja vuzov / S.Y. Demyn, E.Y. Zhukov, N.A.Kubachev i dr.; Pod red. V.Y.Snopkova. Moscow: Transport, 1991. 359 p.
16. Tovstokoryj O. M. Bazovi pryncypy manevruvannja sudnom: navchal»nyj posibnyk. Herson: HDMA, 2018. 336 p.
17. Podder T. K., Sarkar N. Fault – tolerant control of an autonomous underwater vehicle under truster redundancy. *Robotics and Autonomous Systems*. 2001. № 34 (1). P. 39–52.
18. Zemlyakov A. S. Control the angular position of a spacecraft with an excess gyrodin structure. *Bulletin of Kazan State Technical University*. Kazan, 2001. № 4. P. 56–62.
19. Lebedev D.V. Momentum unloading excessive reaction-wheel system of a spacecraft. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2008. Vol. 47, № 4. P. 613–620.

20. Gao W., Tang Q., Yao J., Yang Y. Automatic motion planning for complex welding problems by considering angular redundancy. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. April, 2020. Vol. 62. DOI: 10.1016/j.rcim.2019.101862

21. Zinchenko S., Mateichuk V., Nosov P., Popovych I., Solovey O., Mamenko P., Grosheva O. Use of Simulator Equipment for the Development and Testing of Vessel Control Systems. *Electrical, Control and Communication Engineering*. 2020. Vol.16. P. 58–64. DOI: 10.2478/ecce-2020-0009

22. Navi-Trainer Professional 5000 (versija 5.35). *Navigacijnyj mistook*. Transas MIP Ltd, zhovten, 2014.

23. Navi-Trainer Professional 5000 (versija 5.35). *Kerivnyctvo instruktora*. Transas MIP Ltd, zhovten, 2014.

Зінченко С. М., Носов П. С., Попович І. С. НАДЛИШКОВІСТЬ ПО УПРАВЛІННЮ ЯК КІЛЬКІСНА МІРА МАНЕВРНОСТІ СУДНА

Метою статті є визначення критерію надлишковості по управлінню та розрахунок його значення для різних типів суден і режимів плавання. Проведено короткий огляд літератури, з якого зроблено висновок, що надлишковість по управлінню в основному використовується тільки як резервування для збільшення надійності, але не як засіб оптимізації управління. Показана залежність маневрових можливостей судна від значення поданого критерію та його важливість у класифікації. Запропоновано формулу розрахунку надлишковості по управлінню, а також розраховані значення надлишковості по управлінню для суден з різними схемами управління і режимами плавання.

Ключові слова: морський транспорт, автоматичне керування, надлишкове керування, оптимальне керування, засоби активного керування, схема керування.

Зінченко С. Н., Носов П. С., Попович И. С. ИЗБЫТОЧНОСТЬ ПО УПРАВЛЕНИЮ КАК КОЛИЧЕСТВЕННАЯ МЕРА МАНЕВРНОСТИ СУДНА

Целью статьи является определение критерия избыточности по управлению и расчет его значения для различных типов судов и режимов плавания. Проведен краткий обзор литературы, из которого сделан вывод, что избыточность по управлению в основном используется только как резервирование для увеличения надежности, но не как средство оптимизации управления. Показана зависимость маневренных возможностей судна от значения данного критерия и его важность в классификации. Предложена формула расчета избыточности по управлению, а также рассчитаны значения избыточности по управлению для судов с разными схемами управления и режимами плавания.

Ключевые слова: морской транспорт, автоматическое управление, избыточное управление, оптимальное управление, средства активного управления, схема управления.

© Зінченко С. М., Носов П. С., Попович І. С.

Статтю прийнято
до редакції 19.05.21

НАВИГАЦИОННАЯ СИСТЕМА ГАРАНТИРОВАННОГО БЕЗОПАСНОГО УПРАВЛЕНИЯ МАНЕВРИРОВАНИЕМ СУДОВ БЕЗ ЭКИПАЖА

Мальцев А. С., д.т.н., профессор Национальный университет «Одесская морская академия», e-mail: maltsev-as@nav.onma.edu.ua, ORCID: 0000-0002-2389-230X

Цель статьи заключается в создании навигационного устройства планирования заданного пути по путевым точкам координатами траекторных точек в виде суммы матриц прямолинейных и криволинейных отрезков пути и оперативного контроля параметров маневрирования характерных точек судна. Координаты путевых точек определяют на пересечении прямолинейных отрезков рекомендованного, определенного геодезическими способами, безопасного прямолинейного пути на карте. Актуальной проблемой является разработка новых методов планирования пути и контроля движения по нему с учетом акватории для маневрирования, маневренных свойств судна и внешних воздействий для своевременного обнаружения отклонения параметров от плановых.

Методы: Расчет плановых координат производится для центра тяжести судна для характерных точек пути движения – начала поворота, окончания поворота, начала торможения и траекторных точек прямолинейных отрезков пути через 0,2 кбт на криволинейных участках через 1, 5 или 10 градусов, в зависимости от масштаба карты и угла поворота. Координаты заданного пути оформляются в виде суммы линейных матриц прямолинейных и криволинейных участков пути. Навигационная система управления движением состоит из устройств автоматического определения отклонений от плановых координат и систем поддержки принятия решения, для корректировки появляющихся отклонений. **Результаты:** Исследование предложенного метода планирования и управления движением выполнено путем компьютерного моделирования и проверки в натурных условиях, результаты которых показали, что рассчитанная оптимальная заданная траектория обеспечивает проводку центра тяжести по заданному пути средствами управления судна и соответствует установленным критериям оптимальности. **Обсуждение:** Основным преимуществом метода планирования пути движения судна по таблице путевых точек путем расчета координат траекторных точек по углу перекладки руля для криволинейных траекторий, представления пути в виде суммы линейных матриц координат прямолинейных и криволинейных участков и автоматического оперативного контроля параметров движения. Предложенный метод может быть использован при разработке средств управления для автоматизированных судов с безвахтенным обслуживанием.

Ключевые слова: планирование заданного пути; траекторные точки; матрицы плановых координат; автоматическое определение отклонения; система поддержки принятия решения; проводка центра тяжести; средства управления для автоматизированных судов; безвахтенное обслуживание.

DOI: 10.33815/2313-4763.2021.1.24.038–056

Введение. Статистический анализ причин аварийности морских судов показал, что 10 % аварий происходит вследствие влияния неодолимой силы, около 15 % являются следствием технического их несовершенства и внезапного отказа судового оборудования, а оставшиеся 75 % относятся к «человеческому фактору» независимо от причины аварии.

Наиболее часто происходят навигационные аварийные происшествия, связанные с посадкой на мель и столкновениями. Это свидетельствует о недостаточной профессиональной подготовке штурманского состава судов, отсутствии надлежащей морской практики и недостаточной организации береговых служб, которые координируют работу судов в море, а также позволяет определить порядок организации подготовки данных для безопасного автоматического управления.

Детальный анализ причин происшествий показывает, что они происходят за счет действий отдельных лиц, преобладающими в которых являются организационные ошибки группы операторов [1] при подготовке процесса управления маневрированием и его осуществлении. При этом отмечается разрыв между сложностью современной техники и психологическими возможностями человека оператора как элемента человеко-машинной системы.

Для повышения оперативности и надежности работы системы управления движением необходимо выполнить все возможные процедуры подготовки необходимых расчетов до начала движения. Кроме того, с началом движения необходимо контролировать параметры маневрирования, и при отклонении от заданного пути оперативно пересчитывать новые данные, для корректировки движения.

Контроль над процессом движения сопровождается необходимостью выполнения перепланировки при отклонениях от заданного пути и задания установок средствам управления для приведения судна к заданному направлению движения. Увеличение общей продолжительности таких процедур значительно усложняет судовождение, что может привести к чрезмерному запаздыванию в принятии решения относительно момента начала маневра. Именно при таких условиях возникают предпосылки возникновения аварийных ситуаций. Поэтому приходится ограничиваться обзорно - сравнительной оценкой положения судна посредством визуального определения места и корректировки движения.

Кроме информации о состоянии объекта управления и параметрах внешних воздействий, оператор занят обработкой значительного количества других сведений, связанных с процессом судовождения. Для этого требуется совершенная организация работы операторов ходового мостика, а для повышения оперативности автоматизация обработки параметров та использование систем поддержки принятия решения [2].

Операторская деятельность судоводителя на мостике судна информационно перегружена и плохо обеспечена рекомендациями по принятию решения в экстремальных ситуациях. Многочисленные директивные, нормативные и технические национальные и международные документы плохо приспособлены для оценки ситуации и принятия решения, особенно в аварийных случаях.

Общие рекомендации и правила их применения не обеспечивают оперативного выполнения сложных расчетов и оценки параметров процесса маневрирования, которые должны быть выполнены с упреждением к моменту принятия решения.

Современные высокоавтоматизированные навигационные системы освободили судоводителя оператора от большинства рутинных операций, однако это усилило зависимость эффективности его работы при принятии решения в экстремальных и аварийных ситуациях. Разработка множества рекомендаций для таких ситуаций в условиях ограниченного времени становится невыполнимой задачей. Для усовершенствования нормативной базы систем поддержки принятия решений в аварийных ситуациях ИМО предложила создать такие рекомендации по алгоритму действий оператора управления судном в чрезвычайных ситуациях. Однако до сих пор такие рекомендации не созданы.

Задача значительно усложняется при переходе к управлению процессом движения судна без экипажа береговым постом, поскольку навигационная система управлением движением становится сложной и возникает дополнительный риск отказов. Это требует принятия специальных мер по значительному повышению точности планирования безопасных координат траектории движения, включая прямолинейные и криволинейные отрезки пути, с учетом характеристик торможения и управляемости для текущего состояния водоизмещения. При этом возникают две проблемы: отсутствие навигационных систем определения маневренных характеристик для текущего состояния; отсутствие методики аналитического расчета координат криволинейных участков и необходимых данных о характеристиках управляемости в виде, пригодном для компьютерной обработки.

После того как спланирована заданная безопасная траектория необходимо определить параметры для контроля над процессом движения и способы их получения. Они могут быть известны до начала движения по маршруту или требуют определения в процессе маневрирования. Проблема заключается в том, что для определения некоторых из них, таких как абсциссы полюса поворота (ПП), абсциссы центра тяжести (ЦТ), боковое смещение и ряд других требуется вычисление в процессе маневрирования, что возможно только при использовании быстродействующих автоматических навигационных устройств.

Поэтому совершенствование точности и оперативности работы системы управления маневрированием судна с безвахтенным обслуживанием разделим на две части: создание высокоточной навигационной системы гарантированного безопасного управления маневрированием судна без экипажа [2–4, 7, 12, 14]; переноса пульта дистанционного контроля автоматического и ручного управления движением на берегу. При этом возникнут дополнительные риски, связанные с надежностью работы пульта дистанционного управления.

Другой особенностью системы управления движением судна с безвахтенным обслуживанием является невозможность использования классического способа управления маневрированием, когда необходимо время для определения отклонения от планируемого состояния, расчета новых параметров движения для приведения системы в заданное состояние и отдачу команды на средства управления и ее выполнения. Это требует использования автоматизированных систем обработки информации по маневрированию и поддержки принятия решения.

Предметом нашего исследования является вопрос создания высокоточной навигационной системы гарантированного безопасного управления маневрированием судна без экипажа, что весьма актуально. Вопрос переноса пульта управления на берег является разделом теории автоматизации процесса управления и рассматриваться в данной статье не будет, поскольку он не относится к навигационной части проекта.

Обзор публикаций по теме. Наиболее полное представление об инерционно-тормозных качествах судна [3, 4] дают значения пути и времени торможения при состоянии в грузе и в балласте, для всех возможных сочетаний режимов переднего и заднего хода. Режимы, которые используются в практике маневрирования, будут стандартные градации, которые приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Перечень стандартных маневров скоростью

ПП – ЗП	ППМ – ЗП	ПС – ЗП	ПМ – ЗП	ПСМ – ЗП
ПП – ЗС	ППМ – ЗС	ПС – ЗС	ПМ – ЗС	ПСМ – ЗС
ПП – ЗМ	ППМ – ЗМ	ПС – ЗМ	ПМ – ЗМ	ПСМ – ЗМ
ПП – ЗСМ	ППМ – ЗСМ	ПС – ЗСМ	ПМ – ЗСМ	ПСМ – ЗСМ
ПП – ППМ	ПП – ПС	ПП – ПМ	ПП – ПСМ	ППМ – ПС
ППМ – ПМ	ППМ – ПСМ	ПС – ПМ	ПС – ПСМ	ПМ – ПСМ
Стоп – ПСМ	Стоп – ПМ	Стоп – ПС	Стоп – ППМ	Стоп – ПП
ПСМ - Стоп	ПМ - Стоп	ПС - Стоп	ППМ - Стоп	ПП - Стоп
ПСМ – ПМ	ПСМ – ПС	ПСМ – ППМ	ПСМ – ПП	ПМ – ПС
ПМ – ППМ	ПМ – ПП	ПС – ППМ	ПС – ПП	ППМ – ПП

Как видно из приведенного перечня, все возможные случаи использования сочетаний режимов переднего и заднего ходов будут описывать 50 значений параметров пути и такое же количество времени, а с учетом двух состояний при состоянии в грузе и в балласте, всего 200 параметров.

Из приведенных характеристик в настоящее время суда снабжены только данными о пути и времени торможения для состояния в грузе и балласте для пассивного торможения и активного торможения задним полным ходом, который не используется при эксплуатации, а только предназначен для предаварийных состояний.

Из характеристик управляемости данные об устойчивости обычно не приводятся в судовых документах. Данные о поворотливости имеются частично для углов перекадки руля 15° и 35° и обычно в графической форме, что делает невозможным их использование для планирования в процессе маневрирования. При градации углов через 5° около 70 параметров поворотливости описывают геометрические характеристики циркуляции, 10 % которых имеется на судне.

В связи с отсутствием на судах необходимых данных произвести планирование траектории с точностью, необходимой для гарантированной безопасности управления без вахтенного судна в настоящее время не представляется возможным.

Отсутствие необходимых данных о характеристиках поворотливости не позволяет [2] аналитически планировать координаты криволинейных участков пути, что позволяет выделить эту проблему в качестве основополагающей.

Другой особенностью планирования и контроля перехода рейсового цикла судна без экипажа является [4–7] отсутствие времени для возможности ручной корректировки движения и получения необходимых данных для ее выполнения. Это требует использования автоматизированных систем для оперативного определения текущих параметров, которые не могут быть определены заблаговременно, та систем поддержки принятия решений. Такие системы обеспечивают оперативную обработку информации по отклонению параметров маневрирования судна от плановых и движения по заданным координатам пути без необходимости изменения первоначальных плановых координат, а удержание на заданном пути производится преимущественно изменением курса.

Разработанные способы оперативного контроля вектора смещения от планового пути [8–12] не требуют его перепланировки, а только вызывают необходимость назначения текущего курса с учетом поправки на величину внешних возмущений для выхода и следования по безопасным плановым координатам заданного пути.

Целью данной работы является разработка способа высокоточного автоматического планирования заданных безопасных координат рейсового цикла судна, с учетом его маневренных свойств, включая криволинейные участки, ширины маневренного смещения и алгоритма расчета координат матриц траекторных точек (ТТ) инверсным способом по таблице путевых точек (ПТ). Учитывая существующие требования ИМО к планированию перехода морем рейсового цикла, разделим его на три участка: от причала порта отхода до точки высадки лоцмана; перехода морем от точки высадки лоцмана до его приемки для захода в порт прихода; от точки приема лоцмана до причала порта прихода. Участки по заходу/ выходу судна из порта выделены отдельно потому, что условия плавания предъявляют повышенные требования к точности планирования таких отрезков пути, а лоцман обычно рекомендаций по навигационному обеспечению плавания не представляет. Принято считать, что капитан имеет достаточно информации по таких участках плавания в лоции, и ее достаточно для организации безопасного маневрирования в указанных районах. Однако детальный анализ процесса подготовки судна к плаванию при заходе и выходе из порта и существующих требований международных и национальных нормативных документов показывает, что они не содержат рекомендаций для организации подготовки и управления в таких условиях.

Для этого была разработана методика планирования судового навигационного плана захода и выхода из порта [7, 12–18], детальный алгоритм которого приведен в работе [7]. Критический анализ существующих и используемых в различных странах форм лоцманской проводки судов, показывает, что все они содержат предупреждение о том, что они не пригодны для навигационных целей. Задача значительно усложняется при планировании и управлении процессом движения судна без вахты, когда план движения обязан быть для навигационных целей. По этой причине для таких случаев необходимо использовать высокоточный способ планирования координат прямолинейных и криволинейных участков заданного пути и использовать навигационные устройства оперативного контроля параметров движения и маневрирования, а также автоматического принятия решения по корректировке отклонения от заданных координат.

Способы и методы. Особенностью планирования пути и управления движением судами при без вахтенной эксплуатации на переходе является использование максимально точных способов планирования безопасных координат перехода рейсового цикла та высокоточного контроля текущих координат и параметров движения и маневрирования. Для высокоточного планирования заданных координат рекомендуется использовать новые

способы их представления для прямолинейных и криволинейных участков перехода в виде матриц траекторных точек (ТТ), с указанием координат начала и окончания поворотов [2, 12, 14], за исключением участков захода/ выхода из порта. Для указанных участков необходимо составлять планирование ТТ методом таблицы ПТ [7].

Для выполнения такого планирования необходимо создать навигационную систему определения маневренных характеристик. При этом возможны два подхода: представление данных в виде таблицы характеристик торможения и поворотливости для двух состояний - в грузу и в балласте, и необходимостью интерполировать данные на текущее состояние [3]; расчета характеристик в режиме реального времени для текущего состояния. Без такой системы выполнить точное планирование для судна с безвахтенным обслуживанием не представляется возможным. Для создания такой программы необходимо использовать экспериментально – расчетный способ, приведенный в работе [4], который обеспечивает точность, требуемую нормативными документами ИМО.

Обоснованные ответы на поставленные вопросы можно получить только после рассмотрения всех возможных способов представления данных, анализа достоинств и недостатков каждого из них, приведенных на рис. 1. На основании такого анализа можно определить, какой вид данных и для каких целей необходимо использовать. По способу определения коэффициентов дифференциального уравнения описывающего движение судна, различают: экспериментальный; расчетный; экспериментально-расчетный.

По способу получения значений пути и времени торможения различают: аналитическое решение дифференциальных уравнений; численное решение; графические методы; приближенные эмпирические.

По способу представления характеристик различают: в виде графиков зависимости V и S от времени; в виде линейных графиков ИМО; в виде графиков зависимости S и t от скорости переднего хода; в виде таблиц конечных значений времени маневрирования и пути проходимого при этом.

Приведенная на рис. 1. классификация позволяет произвести анализ существующего состояния вопроса обеспечения данными об инерционно-тормозных характеристиках и выдать обоснованные рекомендации для совершенствования способов обеспечения судов данными о маневренных свойствах.

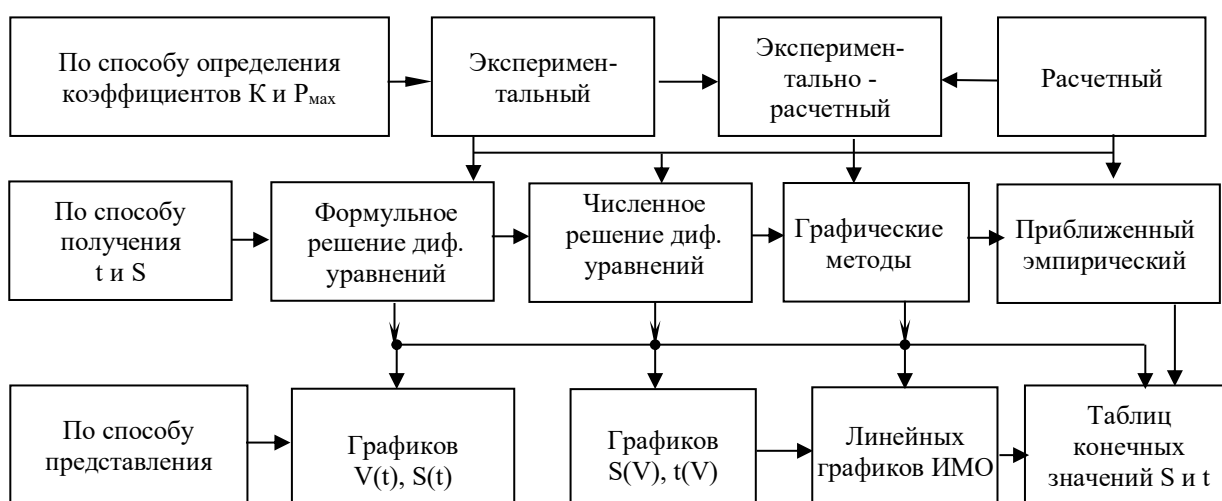


Рисунок 1 – Классификация методов определения тормозных характеристик

Из рассмотренных способов представления данных о характеристиках торможения и поворотливости наиболее удобной для компьютерной обработки и компактной является табличная форма параметров. Она легко интерполируется и не требует затрат времени для выполнения вычислений в процессе маневрирования.

Классический способ оформления результатов графического планирования рейсового цикла предполагает составление таблицы путевых точек (ПТ) от высадки

лоцмана в порту отхода до приема его на борт в порту прихода. Для участков выхода из порта и захода в порт прихода требуется составление судового плана лоцманской проводки высокоточными способами в виде матриц ГТ для навигационных целей [7]. Для планирования координат перехода необходимо по таблице ПТ, которая будет одинаковой для всех судов, рассчитать матрицы ГТ перехода, включая прямолинейные и криволинейные участки пути. При этом координаты пути будут индивидуальными для данного судна и заданного района плавания.

Для выполнения перехода по плановому пути необходимо определить способ выбора курса на участках перехода в зависимости от наличия данных: угла ветрового дрейфа α , угла сноса течением β , угла сноса от рыскания на постоянном курсе $\omega_{\text{пер}}$, абсциссы центра тяжести X_G , абсциссы полюса поворота $X_{\text{пп}}$, положение спутниковой антенны относительно ЦТ, а также оперативного контроля ширины полосы маневренного смещения [18].

В работе [19] приведены детальные требования к средствам навигации и маневрирования дистанционно управляемых судов, которые существенно отличаются от требований ИМО. Эти требования значительно увеличивают количество средств управления судна, облегчая маневрирование. Увеличено количество испытательных маневров, для более точного определения устойчивости и поворотливости. Это создает условия для качественного выполнения организационно-распорядительной подготовки и обеспечивает исходные данные для надлежащего планирования. Однако способ представления данных о маневренных свойствах, которые необходимы для компьютерной обработки, и вопросы планирования криволинейных траекторий не рассмотрены.

Существует четыре способа управления процессом маневрирования для назначения курса [3]: курсовой; курсовой по отклонению; курсовой по возмущению; курсовой комбинированный. С навигационной точки зрения наиболее точным является курсовой комбинированный, однако он требует [2] определения параметров дрейфа, течения, высокоточного определения координат текущего места, расчета абсциссы ПП, абсциссы ЦТ, вектора бокового сноса, пересчета текущих координат на ЦТ в процессе маневрирования. Это требует затрат времени и не всегда позволяет определить необходимые параметры к моменту принятия решения и требует использования средств автоматизации обработки информации и систем поддержки принятия решения по маневрированию.

При организации процесса управления маневрированием возможны два способа учета воздействия внешних факторов: математического моделирования; экспертной оценки состояния текущих координат относительно заданного пути.

При использовании математического моделирования судоводитель должен, до начала перехода при планировании заданных безопасных координат траекторных точек, определить: угол ветрового дрейфа по прогнозу погоды на соответствующий участок перехода α ; определить направление и скорость течения по лоции и рассчитать угол сноса течением β ; угол сноса от рыскания ΔK_p и определить поправку компаса ΔK . После этого необходимо рассчитать компасный курс KK по формуле:

$$KK = IK \pm \alpha \pm \beta \pm \Delta K_p \pm \Delta K. \quad (1)$$

Его значение необходимо пересчитывать всякий раз при изменении IK и характера внешних воздействий. Другим недостатком этого способа является отсутствие корректных способов для расчета указанных поправок, а также недостаток времени для выполнения соответствующих расчетов в процессе маневрирования. Даже использование современной вычислительной техники не позволяет оперативно получить, с достаточной точностью, необходимые данные к моменту принятия решения по управлению движением.

Способ экспертной оценки позволяет существенно повысить оперативность и точность расчета необходимых данных за счет отказа от расчета соответствующих параметров внешних воздействий. Оперативность достигается за счет расчета

минимального количества данных и использования систем поддержки принятия решения, а точность обеспечивается применением предварительного планирования координат траекторными точками, включая криволинейные участки, с использованием информации о характеристиках поворотливости. При этом единственным параметром, который определяют, является угол сноса γ , без учета параметров внешних и внутренних факторов. Он позволяет ввести поправку в текущий КК таким образом, чтобы за один интервал дискретизации измерений вывести судно на заданный путь и в дальнейшем изменить курс так, чтобы центр тяжести перемещался по линии заданного пути.

При этом будем использовать двух интервальный период корректировки. В то же время при движении по криволинейной траектории будем использовать одно интервальный период корректировки изменением перекладки руля.

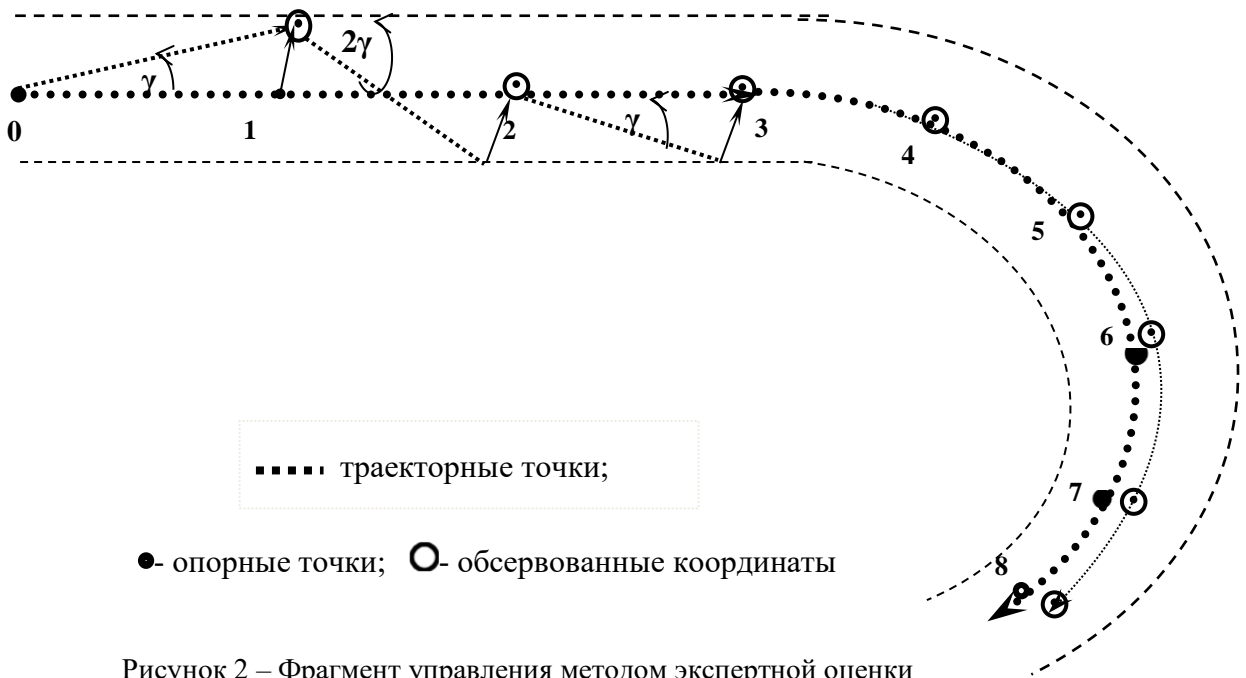


Рисунок 2 – Фрагмент управления методом экспертной оценки

Для пояснения процесса корректировки движения методом экспертной оценки рассмотрим фрагмент пути, приведенный на рис. 2, который состоит из прямолинейного и криволинейного участков, спланированных в виде координат центра тяжести судна траекторными точками.

В зависимости от интервала времени дискретизации Δt_{dis} и плановой скорости V_{pl} наносят опорные точки 0, 1, 2, 3, на расстоянии ΔS_{dis} на прямолинейной траектории $\Delta S_{dis} = V_{pl} \cdot \Delta t_{dis}$. Точка 3 является началом перекладки руля и криволинейной траектории. По этой причине необходимо определить приближенно относительную установившуюся скорость судна на циркуляции \bar{V}_{cons} по фактору корпуса и руля по зависимости [15]:

$$\bar{V}_{cons} = 1 - 0,056 \frac{\delta^0}{\Phi}, \quad (2)$$

где δ^0 – угол перекладки руля в градусах; Φ – фактор корпуса и руля, который рассчитывают по формуле:

$$\Phi = \frac{\frac{L}{B} \sigma_k^2}{\sqrt{S_p + \lambda_p}}, \quad (3)$$

где $\frac{L}{B}$ – отношение длины между перпендикулярами к ширине; σ_k – коэффициент полноты площади погруженной части ДП, рассчитываемый по формуле:

$$\sigma_k = 1 - \frac{f_k}{L \cdot T_{cp}}, \quad (4)$$

где f_k – площадь, которая ограничивается кормовым перпендикуляром, линией киля и контуром кормы (площадь подреза кормы); L – длина судна между перпендикулярами, м; T_{cp} – средняя осадка, м; \bar{S}_p – относительная площадь пера руля, выраженная в % к площади погруженной части ДП:

$$\bar{S}_p = S_p / L \cdot T_{cp}. \quad (5)$$

λ_p – относительное удлинение пера руля, рассчитываемое по формуле:

$$\lambda_p = \frac{h^2}{S_p}, \quad (6)$$

h – высота руля по балеру, м; S_p – площадь пера руля.

Обычно установившийся режим циркуляции наступает при повороте на угол около 180° и падение скорости происходит приблизительно по линейному закону, тогда для расчета участка интерполяции определим среднюю скорость на каждом периоде и координаты опорных точек по значению угла поворота руля по формуле:

$$\Delta V = V_{pl} - V_{cons}. \quad (7)$$

Зная падение скорости за поворот, время поворота и интервал $\Delta\Theta$ дискретизации определяют скорость на каждом участке, пройденный путь и координаты опорных точек 4, 5, 6, 7 и 8 по координатам ГТ [2, 7].

Для обеспечения управления по криволинейной траектории ее необходимо тщательно спланировать высокоточным способом. Кроме того, процесс движения на повороте быстротечен, и исключает возможность выполнения каких-либо расчетов при управлении. По этой причине все необходимые расчеты должны быть выполнены заблаговременно, а те вычисления, которые могут быть выполнены только при управлении, должны быть автоматизированы.

Для выполнения расчетов необходимы элементы, которыми могут быть устройства, вычислители, а также человек, как звено в системе управления.

Первым звеном в системе является блок выбора интервала дискретизации. После выбора координат прямолинейных участков рассчитывают координаты криволинейных траекторий в следующей последовательности:

- рассчитывают угол поворота $\Delta\Theta$ по формуле:

$$\Delta\Theta = IK_2 - IK_1, \quad (8)$$

где IK_2 – истинный курс после поворота; IK_1 истинный курс до поворота;

- выбирают угол перекладки руля при входе в криволинейное движение с учетом следующих рекомендаций [3]:

$$\delta_{вх} = \begin{cases} 5^\circ & \text{при } \Delta\Theta \text{ до } 30^\circ; \\ 10^\circ & \text{при } \Delta\Theta = 30^\circ - 60^\circ; \\ 15^\circ & \text{при } \Delta\Theta \text{ более } 60^\circ. \end{cases} \quad (8)$$

После этого выбирают интервал дискретизации $\Delta\Delta\Theta$ и рассчитывают число промежуточных точек на циркуляции по формуле $n = \Delta\Theta / \Delta\Delta\Theta$.

Из системы расчета маневренных характеристик поступает информация о характеристиках поворотливости ℓ_1, ℓ_2, D_x, D_y , по которым определяются методом отрезков [3] координаты точек начала, окончания и промежуточных точек и данные поступают на индикацию и в память в виде матрицы поворота.

Полученная система плановых точек является высокоточной, поскольку построена по характеристикам поворотливости данного судна. В дальнейшем, при выборе угла перекладки руля, его будем назначать с запасом, не более 15^0 . Если в стесненных условиях при ветре перекладки руля недостаточно, для компенсации сноса, то рекомендуется использовать буксир, как средство улучшения управляемости.

Для прямолинейного участка будем рассматривать процесс управления из нулевой точки. Через интервал дискретизации Δt_{dis} определяют место судна высокоточными способами $\varphi_{1тек}, \lambda_{1тек}$.

Для определения величины отклонения центра тяжести судна от опорной точки 1 необходимо определить координаты спутниковой антенны судна высокоточными методами, используя дифференциальный режим. При этом точность должна быть близкой к геодезическим способам. После того как определили место спутниковой антенны судна, его координаты необходимо перечислить на центр тяжести судна, как приведено на рис. 3.

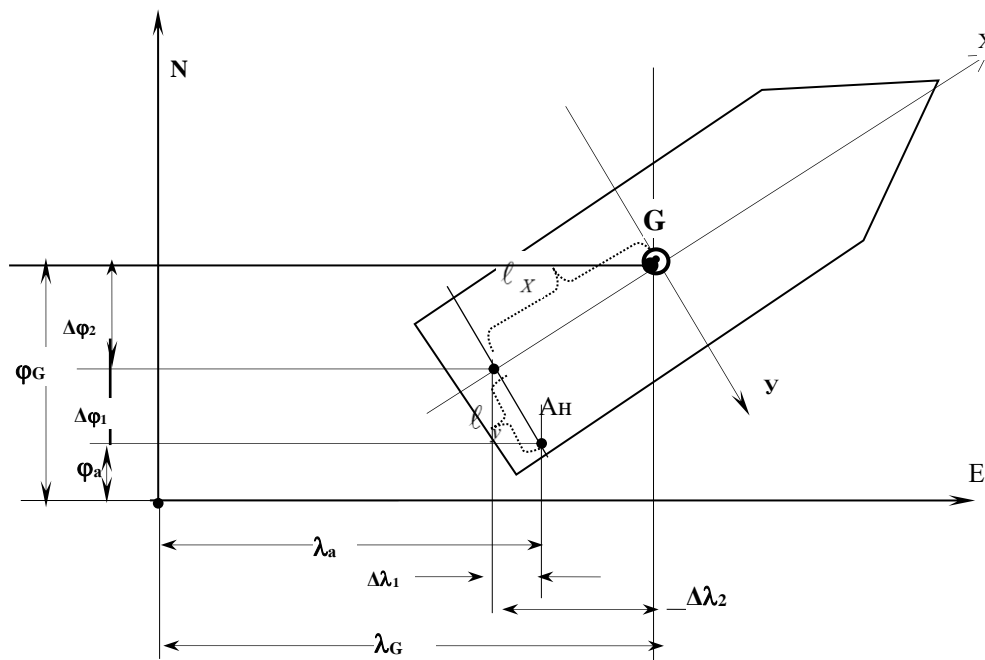


Рисунок 3 – Приведение координат антенны к центру тяжести судна

Геометрический анализ алгоритма расчета поправок координат при пересчете показал, что их величина не является постоянной [2, 5, 8, 12, 14]. Она меняется в зависимости от координат спутниковой антенны, места ее расположения на судне и текущего значения курса. Координаты ЦТ φ_G и λ_G разраховываются по φ_a и λ_a при курсе K в диапазоне $0^0 \leq K \leq 90^0$, с учетом рис.3, при условии $\varphi_a \geq 0, \lambda_a \geq 0$, по следующим зависимостям:

$$\varphi_G = \varphi_a + \Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 = \varphi_a + \Delta\varphi_G \quad \text{и} \quad \lambda_G = \lambda_a - \Delta\lambda_1 + \Delta\lambda_2 = \lambda_a + \Delta\lambda_G, \quad (9)$$

где $\Delta\lambda_1$ – проекция расстояния точки расположения антенн A_n от ДП, в милях;

$\Delta\lambda_2$ – проекція расстояния точки расположения антенн от центра тяжести (ЦТ), в милях;
 $\Delta\varphi_1$ – проекція расстояния точки расположения антенн от ДП на ось φ , в милях;
 $\Delta\varphi_2$ – проекція расстояния точки расположения антенны от ЦТ на ось φ , в милях;
 $\Delta\lambda_G$ и $\Delta\varphi_G$ – поправки координат ЦТ.

В развернутом виде уравнение (9) можно записать так:

$$\Delta\lambda_1 = \ell_y \cdot \cos K; \Delta\lambda_2 = \ell_x \cdot \sin K, \quad (10)$$

$$\Delta\varphi_1 = \ell_y \cdot \sin K; \Delta\varphi_2 = \ell_x \cdot \cos K \quad (11)$$

Тогда, после подстановки (10) и (11) в (9) получим текущие координаты ЦТ:

$$\lambda_G = \lambda_a - \ell_y \cdot \cos K + \ell_x \cdot \sin K \quad (12)$$

$$\varphi_G = \varphi_a + \ell_y \cdot \sin K + \ell_x \cdot \cos K \quad (13)$$

После того как текущие координаты ЦТ определены $\varphi_{1\text{тек}}$, $\lambda_{1\text{тек}}$, можно приступить к автоматическому расчету величины смещения между заданными опорными координатами φ_1 , λ_1 и текущими $\varphi_{1\text{тек}}$, $\lambda_{1\text{тек}}$ за такими формулами:

$$РД = \lambda_1 - \lambda_{1\text{тек}}. \quad (14)$$

$$РШ = \varphi_1 - \varphi_{1\text{тек}}. \quad (15)$$

Значение меридиональных частей в экваториальных минутах для эллипсоида Красовского может быть вычислено по формуле:

$$МЧ = 3437,7468 \cdot \ln \left\{ \operatorname{tg} (45^\circ + \varphi / 2) \left(\frac{1 - e \cdot \sin \varphi}{1 + e \cdot \sin \varphi} \right)^{e/2} \right\}, \quad (16)$$

де $МЧ$ – меридіональна частина паралелі φ , екв. хв.; φ – географічна широта; e – ексцентриситет земного еліпсоїда.

Найменування $МЧ$ однаково з найменуванням широти φ . Для отримання різниці меридіональних частин ($РМЧ$) необхідно розрахувати $МЧ_1$, потім $МЧ_{1\text{тек}}$, і після цього алгебраїчну різницю:

$$РМЧ = МЧ_1 - МЧ_{1\text{тек}}. \quad (17)$$

Найменування $РМЧ_1$ вказується від $МЧ_1$ до $МЧ_{1\text{тек}}$, тобто відповідає найменуванню $РШ$. Напрямок знесення $И$ розраховують за формулою:

$$\operatorname{tg} И K_{31} = \frac{\lambda_1 - \lambda_{1\text{тек}}}{РМЧ_1}. \quad (18)$$

Направление сноса получают в четвертном счете и для пересчета в круговой необходимо учитывать, что первая буква четверти соответствует наименованию $РШ$, а вторая $РД$.

Величину сдвига определяют по формуле:

$$d_{\text{тек}} = РШ \cdot \operatorname{sec} И K_{31}. \quad (19)$$

Расчеты по приведенным формулам (14)–(19) имеют ту особенность, что вычисления происходят в районе более малых расстояний, которые требуют расчетов до десятитысячных долей минуты. Это требование необходимо выполнять для того, чтобы уменьшить вычислительные погрешности к минимуму после округления результатов. Поскольку значение $МЧ$ в таблице МТ 2000 дано с точностью до 0,1 экваториальной

минуты, то необходимо проводить расчет МЧ по формуле (16) с точностью до пятого знака с последующим округлением последней цифры.

После того, как определен вектор смещения необходимо рассчитать длину вектора путевого перемещения по координатам обсервованной $\varphi_{1тек}, \lambda_{1тек}$ и нулевой φ_0, λ_0 точек по формулам:

$$PД_0 = \lambda_{1тек} - \lambda_0; \quad (20)$$

$$PШ_0 = \varphi_{1тек} - \varphi_0; \quad (21)$$

$$PМЧ_0 = МЧ_{1тек} - МЧ_0; \quad (22)$$

$$tgIK_{01тек} = \frac{PД_0}{PМЧ_0}. \quad (23)$$

Величину угла сноса γ можно рассчитать по формуле:

$$\gamma = IK_{01тек} - IK_{П}. \quad (24)$$

Тогда величина КК во вторую опорную точку будет равным:

$$КК_2 = IK_{П} + 2 \cdot \gamma + \Delta К, \quad (25)$$

где $IK_{П}$ – плановый курс для перемещения по заданной траектории.

При неизменных внешних условиях по прямолинейному участку с приходом во вторую точку определяют место, которое должно совпадать с опорной точкой 2 и необходимо изменить курс в третью точку, который определяют по формуле:

$$КК_3 = IK_{П} + \gamma + \Delta К. \quad (25)$$

В момент прихода в точку 3 определяют место и переключают руль на 15° вправо, как показано на рис. 4.

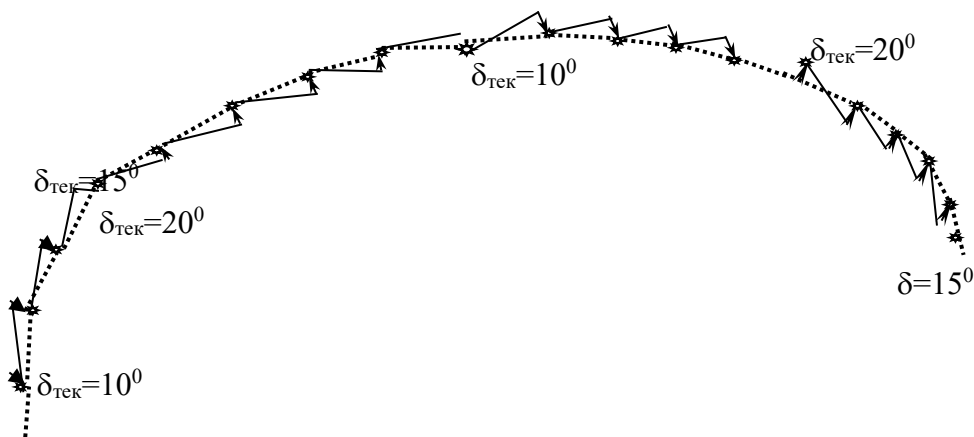


Рисунок 4 – Оптимизация управления по криволинейной траектории путем экспертной оценки

Полученная система плановых точек является высокоточной, поскольку построена по характеристикам поворотливости данного судна. В дальнейшем, при выборе угла перекладки руля, его будем назначать с запасом, не более 15° . Если в стесненных условиях при ветре перекладки руля недостаточно, для компенсации сноса, то рекомендуется использовать буксир, как средство улучшения управляемости.

Алгоритм векторного управления будет следующим, как приведено на рис. 4. Для компенсации сноса будем использовать изменение угла перекладки руля на 5° . При этом если снос происходит вправо от линии планового пути при повороте вправо, то уменьшают

перекладку руля на 5^0 . Если снос происходит влево от линии планового пути, то увеличивают угол перекладки руля на 5^0 .

Вектор сноса рассчитывают по координатам плановой (φ_n, λ_n) и обсервованной (φ_o, λ_o) точек. В качестве примера, на рис.4. показано, что при обсервации в момент поворота на 10^0 , при угле перекладки руля 15^0 , обнаружили вектор сноса вправо. Для компенсации сноса переложили руль на 10^0 . При определении места судна в момент поворота на 20^0 и 30^0 текущие точки совпадали с плановыми, поэтому угол перекладки удерживали на 10^0 . В момент определения места при выходе в точку поворота 40^0 обнаружили, что обсервованная точка сместилась влево от плановой траектории, для компенсации вектора сноса переложили руль вправо на 20^0 и удерживали его в переложеном положении до угла поворота 90^0 .

При повороте на 90^0 и определении места обнаружили вектор сноса вправо. Для компенсации сноса переложили руль влево на 5^0 и удерживали в переложеном на 10^0 положении до угла поворота 140^0 .

При повороте на 140^0 обнаружили вектор сноса влево от плановой траектории. Для компенсации сноса переложили руль на угол 20^0 и удерживали в таком положении до появления сноса вправо и перекладка руля на 15^0 до конца криволинейной траектории.

Таким образом, для управления по криволинейной траектории достаточно одного периода дискредитации для компенсации вектора сноса.

Для проверки работы компьютерной программы сделаем расчет контрольного примера вручную, при значении $d_{\text{доп}} = 10\text{м}$. При работе судна в координатах $\varphi_1 = 20^0 14,6000' \text{ S}$, $\lambda_1 = 5^0 22,7000' \text{ W}$ получили место в точке 1 с использованием спутниковой системы в дифференциальной режиме с радиальной СКП равной $\pm 1\text{м}$ и $\varphi_{1\text{шт}} = 20^0 14,605' \text{ S}$, $\lambda_{1\text{шт}} = 5^0 22,703' \text{ W}$.

Для того, чтобы показать порядок величин, с которыми автоматическому устройству придется работать, рассмотрим контрольный пример с предельно малым отклонением. Результаты выполненных расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Расчет малых значений параметров сноса внешними воздействиями

$\lambda_{1\text{тек}} = 5^0 22,703' \text{ W}$		$\varphi_{1\text{тек}} = 20^0 14,605' \text{ S}$		$\text{МЧ}_{1\text{тек}} = 1432,705'$	
$\lambda_1 = 5^0 22,7000' \text{ W}$		$\varphi_1 = 20^0 14,6000' \text{ S}$		$\text{МЧ}_1 = 1432,7'$	
$\lambda_G - \lambda_r$	$0^0 0,003' \text{ к W}$	РШ	$0^0 0,005' \text{ к S}$	РМЧ	$0,005' \text{ к S}$
$\lambda_G - \lambda_r$	$0,003' \text{ к W}$	РШ	$0,005' \text{ к S}$	–	–
Напрямок зносу IK_c					
РД	$0,003 \text{ к W}$	$lg = -2,5229$		–	–
РМЧ	$0,005' \text{ к S}$	+ $lg = -2,3010$		–	–
IK_3	$30^0 53'$	$lg \ tg \ IK_3$	$-0,2219$	–	–
IK_3	$210^0 53'$	$tg \ IK_3$	$0,598$	–	–
Розрахунок відстані зносу $d_{\text{тек}}$					
РШ	$0,005' \text{ к S}$	+ $lg = -2,3010$		Поскольку $d_{\text{тек}} > M_0$ то это значит, что произошло недопусти-мое отклонение и необходимо корректировать	
IK_c	$210^0 53'$	$lg \ sec \ IK_c = -0,0614$			
$d_{\text{тек}}$	$0,005' = 9.3\text{м}$	$lg \ d_{\text{тек}}$	$-2,3624$		

Обсуждение результатов работы. Для создания условий гарантированного безопасного управления процессом перемещения судна без экипажа морем, необходимо его разделить на две части: планирование безопасного пути перехода; управление движением по нему с использованием современных навигационных систем поддержки принятия решения.

Исходной навигационной системой, данные которой являются необходимыми для работы всех навигационных систем, является интерполяция параметров торможения и поворотливости по таблицам значений параметров для текущего состояния судна.

После этого выбирают прямолинейные участки пути и по ним определяют координаты путевых точек пересечения истинных курсов. Указанные ПТ будут безопасны с навигационной точки зрения, поскольку они расположены на линии рекомендованного пути, нанесенного гидрографической службой на карте.

Результаты полученных координат ПТ заносят в таблицу (табл. 3) и по ним выполняют следующие действия.

Таблица 3 – Фрагмент путевых точек сценарного планирования инверсным способом заходу т/х Safmarine Nuba в порт Черноморск к причалу Fishing Port 8

WP	LAT	LON	Course	Θ
0	46°18,93' N	30°41,58' E		
1	46°19,3' N	30°39,95' E	288,5	57,2
2	46°19,71' N	30°39,8' E	345,7	35,1
3	46°19,83' N	30°39,86' E	20,8	

1. Из таблицы маневренных характеристик [3, 7, 12-15.] выбирают величину тормозного пути $S_{\text{торм}}$ для режима ПМ –ЗС и откладывают его значение от центра тяжести при остановке у причала, и получают точку начала торможения.

2. Определяют угол поворота для каждой ПТ.

3. Определяют угол перекладки руля по величине угла поворота и характеристики поворота для него.

4. По координатам путевой точки и характеристикам поворота методом отрезков определяют координаты точки начала и окончания поворота.

5. Методом отрезков рассчитывают координаты траекторных точек криволинейного участка пути и формируют матрицу ТТ данной ПТ.

6. Для каждой ПТ определяют координаты криволинейной траектории методом отрезков и формируют матрицу каждой из них.

7. От первой ПТ к точке начала циркуляции определяют координаты прямолинейных отрезков через 0.2 кбт, и в дальнейшем от точки окончания циркуляции к точке начала следующего поворота и формируют матрицы прямолинейных участков.

8. Формируют точки заданного пути в виде матриц ТТ, содержащие координаты, в которых нужно начинать, производить и оканчивать повороты, и прямолинейных отрезков. Это оптимальный безопасный заданный алгоритм функционирования системы управления судном, реализация которого позволит безаварийно заходить в порт и швартоваться, который в качестве примера приведен на рис. 5.

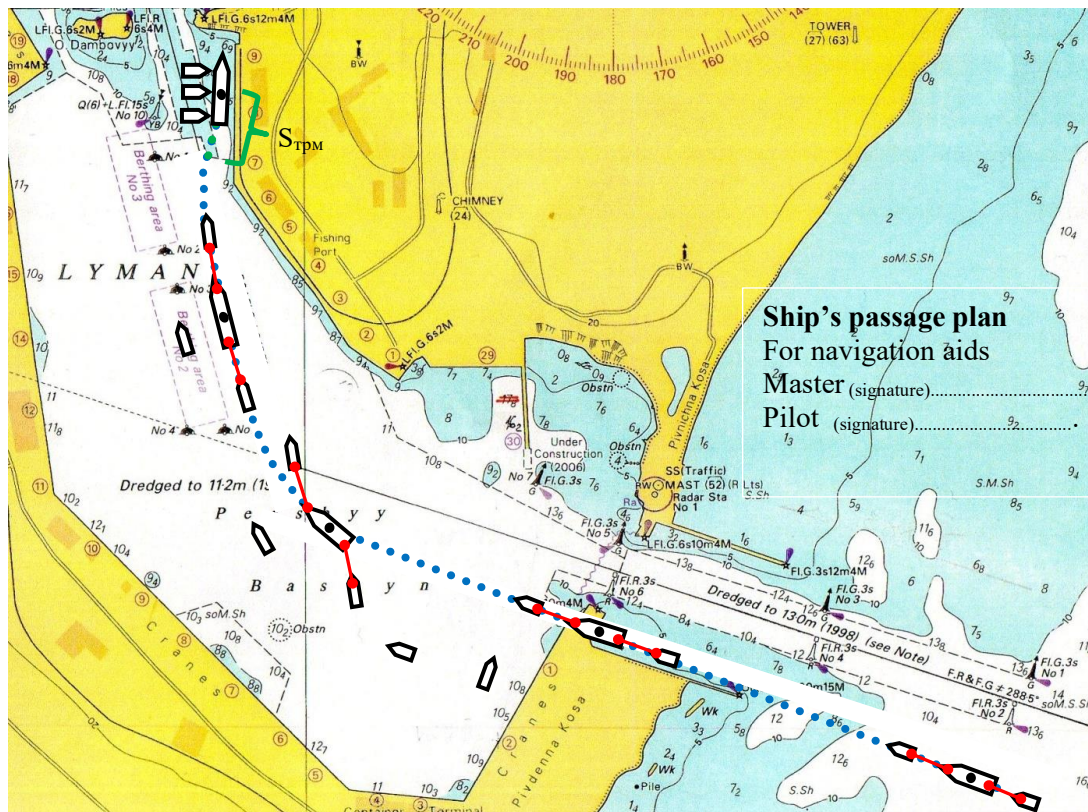


Рисунок 5 – Судовий план проводки т/х Safmarine Nuba к причалу Fishing Port 8 порта Черноморск

9. Для обеспечения движения необходимо использовать следующие системы ППР, в соответствии со структурой планирования координат пути рейсового цикла ТТ и контроля безопасного управления по нему приведенной на рис. 6: расчета характеристик торможения и управляемости; пересчете маневренных характеристик на мелководье; формирование плана перехода в виде путевых точек; планирование перехода в виде матриц ТТ; перерасчета координат спутниковой антенны судна в центр его тяжести; определение вероятной ширины бокового сдвига; предупреждения посадки судна на мель; принятия решения по оперативному определению абсциссы ПП; выбора безопасной скорости по условиям плавания; выбора точки приложения буксиров и индикации положения ЧП на контуре ватерлинии; выбора маневра для предупреждения об опасном и аварийном приближении и рекомендаций по маневрированию для его предупреждения.

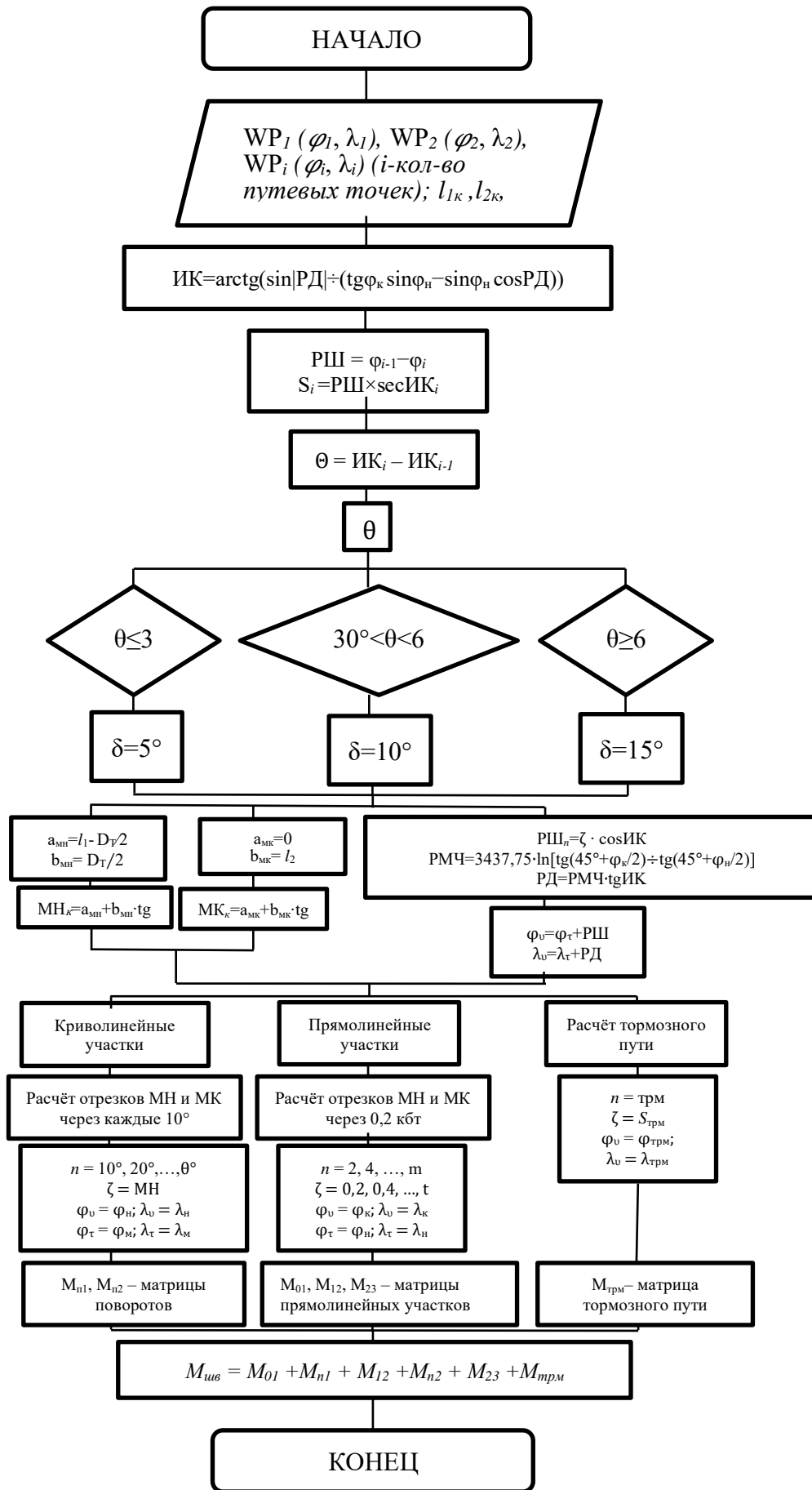


Рисунок 6 – Блок-схема расчета координат заданного алгоритма управления маневрированием

Выводы. Для обеспечения безопасного выполнения рейсового цикла в автоматическом режиме без вахтенного обслуживания на судне, необходимо спланировать путь центра тяжести судна ТТ, в виде координат плана движения с учетом навигационной акватории оформленного в виде суммы матриц прямолинейных и криволинейных участков пути. Они рассчитываются по прямолинейным участкам рекомендованного пути на карте, ограниченных путевыми точками. Координаты ТТ пути рассчитываются с учетом конфигурации акватории для маневрирования, характеристик торможения и поворотливости и видов используемых маневров. Для выполнения управления по плановой траектории необходимо использовать новейшие навигационные системы, которые созданы в последнее время. Основными из них являются устройства расчета маневренных характеристик и высокоточного планирования пути траекторными точками по координатам путевых точек, выбранных на пересечении прямолинейных отрезков рекомендованного пути на карте.

Результаты подготовки представляются в виде суммы линейных матриц отдельных участков, включая криволинейные. Кроме того, отдельно определяются координаты точек начала торможения у причала, перекладки руля при выполнении поворотов в путевых точках, окончания поворотов и углов перекладки руля в каждой из них.

Для контроля процесса движения необходимо использование автоматических устройств предупреждения посадки на мель, оценки ширины полосы маневренного смещения, автоматического контроля процесса сближения с другими судами и выбора маневра для расхождения.

Это позволит создать методику разработки нормативного документа для капитана по составлению «Судового плана захода/выхода из порта» для навигационных целей, включая автоматизацию его подготовки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мальцев А. С., Голикова В. В. Динамика психофизиологических функций у курсантов и судоводителей при решении задач судовождения на радиолокационном тренажере. *Актуальные проблемы транспортной медицины : сб. научн. трудов УкрНИИ медицины транспорта*. Одесса, 2007. Вып. 1(7). С.20–26.
2. Мальцев А. С., Бень А. П. Системы принятия решений по управлению движением судна : монография. Херсон : ХГМА, 2019. 240 с.
3. Мальцев А. С., Голиков В. В., Сафин И. В., Мамонтов В. В. Методологические основы маневрирования судов при сближении. Одесса : ОНМА, 2013. 218 с.
4. Вильский Г. Б., Мальцев А. С., Бездольный В. В., Гончаров Е. И. Навигационная безопасность при лоцманской проводке судов / под ред. А. С. Мальцева, Г. Б. Вильского. Одесса-Николаев : Феникс, 2007. 456 с.
5. Мальцев С. Э., Товстокорый О. Н. Полнос поворота и его учет при маневрировании морского судна : монография. Херсон : ХГМА, 2016. 124 с.
6. Мальцев С. Е. Когнитивная система оценки положения полюса поворота судна с помощью эффективных алгоритмов. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Natural and Technical Sciences*. 2018. V.1 (19), issue 171. P. 37–42.
7. Мальцев С. Е. Навігаційний пристрій підтримки прийняття рішення при автоматичному плануванні руху судна траекторними точками при заході/виході із порту. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Natural and Technical Sciences*. 2019. V. 11 (25), issue 206. P. 41–46.
8. А. с. на комп'ютерну програму 68552 Україна. Система високоточного планування шляху переходу морського судна / А. С. Мальцев, А. П. Бень, О. В. Терещенкова, В. І. Соколенко (Україна). № 68552 ; опубл. 09.11.16.
9. Навігаційний пристрій для вибору виду вектору управління рухом : пат. 111646 Україна. МПК (2016.01) G08G 3/00. № у 2016 02487; заявл. 14.03.2016; опубл. 25.11.2016, Бюл. № 22.

10. Спосіб інформаційного забезпечення маневрування морського судна : пат. 100293 Україна. МПК G08G 3/00 (2015/01). № u 2014 12711; заявл. 26.11.2014; опубл. 27.07.2015, Бюл. № 14.
11. Голиков В. В., Мальцев С. Э. Алгоритм определения положения полюса поворота морского судна. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії : науковий журнал*. Херсон : ХГМА, 2013. № 1 (8). С. 21–27.
12. Sokolenko Vasyliy. The system of precision planning marine ship's voyage. *Proceedings of National Aviation University*. Kiev : NAU, 2016. Vol. 68, № 3 (216). P. 46–53.
13. Соколенко В. И. Судовой план лоцманской проводки. *Судовождение : сб. научн. трудов / ОНМА*. Одесса : «ИздатИнформ», 2011. Вып. 20. С. 209–220.
14. Соколенко В. И. Планирование заданного пути движения в стесненных условиях траекторными точками и контроль процесса движения. *Судовождение : сб. научн. трудов / ОНМА*. Одесса : «ИздатИнформ», 2012. Вып. 21. С. 220–227.
15. Снопков В. И. Управление судном. Санкт-Петербург : Професионал, 2004. 535 с.
16. Мальцев А. С. Динамічне позиціонування судна при відхиленнях параметру управління, величина якого порівняна з похибками його визначення. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії : науковий журнал*. Херсон : Херсонська державна морська академія. 2020. № 1 (20). С. 44–54.
17. Голиков В. В., Мальцев С. Э. Анализ вектора смещения пути судна от ветра. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії : науковий журнал*. Херсон : ХГМА, 2015. № 1 (12). С. 29–35.
18. Мальцев С. Е. Оперативний контроль ширини маневреного зсуву в стислих водах. *Судноводіння : збірник наукових праць НУ «ОМА»*. Одеса : «ВидавІнформ», 2021. Вип. 31. С. 22–37.
19. НД № 2-030101-037. Положення по классификации морских автономных и дистанционно управляемых надводных судов (МАНС). Санкт-Петербург : Росийский морской регистр судоходства, 2020. 96 с.

REFERENCES

1. Maltsev A. S., Golikova V. V. (2007). Dinamika psikhofiziologicheskikh funkciy u kursantov i sudovoditeleyj pri reshenii zadach sudovozhdeniya na radiolokacionnom trenazhere. *Aktualjnihe problemih transportnoj medicinih : sb. nauchn. trudov UkrNII medicinih transporta*. Odessa. 1 (7), 20–26.
2. Maltsev A. S., Benj A. P. (2019). *Sistemih prinyatiya resheniyj po upravleniyu dvizheniem sudna : monografiya*. Kherson : KhGMA.
3. Maltsev A. S., Golikov V. V., Safin I. V. & Mamontov V. V. (2013). *Metodologicheskie osnovih manevrirovaniya sudov pri sblizhenii*. Odessa : ONMA.
4. Viljskiyj G. B, Maltsev A. S., Bezdoljniyj V. V. & Goncharov E. I. (2007). *Navigacionnaya bezopasnostj pri locmanskoj provodke sudov / A. S. Maljceva, G. B. Viljskogo (Ed)*. Odessa-Nikolaev : Feniks.
5. Maltsev S. Eh., Tovstokorihyj O. N. (2016). *Polyus povorota i ego uchet pri manevrirovanii morskogo sudna : monografiya*. Kherson : KhGMA.
6. Maltsev S. E. (2018). Kognitivnaya sistema ocenki polozeniya polyusa povorota sudna s pomothjyu ehffektivnihk algoritmov. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Natural and Technical Sciences*. 1 (19), Is. 171, 37–42.
7. Maltsev S. E. (2019). Navihatsiinyi prystrii pidtrymky pryiniattia rishennia pry avtomatychnomu planuvanni rukhu sudna traiektornymu tochkamuy pry zakhodi/vykhodi iz portu. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Natural and Technical Sciences*. 11 (25), Is. 206, 41–46.

8. A. s. na kompiuternu prohramu 68552 Ukraina. *Systema vysokotochnoho planuvannia shliakhu perekhodu morskoho sudna* / A. S. Maltsev, A. P. Ben, O. V. Tereshchenkova, V. I. Sokolenko (Ukraina). # 68552 ; opubl. 09.11.16.
9. *Navihatsiinyi prystrii dlia vyboru vydu vektoru upravlinnia rukhom* : pat. 111646 Ukraina. MPK (2016.01) G08G 3/00. # u 2016 02487; zaiavl. 14.03.2016; opubl. 25.11.2016, Biul. # 22.
10. *Sposib informatsiinoho zabezpechennia manevruvannia morskoho sudna* : pat. 100293 Ukraina. MPK G08G 3/00 (2015/01). # u 2014 12711; zaiavl. 26.11.2014; opubl. 27.07.2015, Biul. # 14.
11. Golikov V. V., Maljcev S. Eh. (2013). Algoritm opredeleniya polozheniya polyusa povorota morskogo sudna. *Naukoviy visnik Khersonskoy derzhavnoy morskoy akademii : naukoviy zhurnal*. Kherson : KhGMA, 1 (8), 21–27.
12. Sokolenko Vasyliy. (2016). The system of precision planning marine ship's voyage. *Proceedings of National Aviation University*. Kiev : NAU. 68, 3 (216), 46–53.
13. Sokolenko V. I. (2011). Sudovoy plan lochmanskoj provodki. *Sudovozhdenie : sb. nauchn. trudov / ONMA*. Odessa : Izdat Inform, 20, 209–220.
14. Sokolenko V. I. (2012). Planirovanie zadannogo puti dvizheniya v stesnennikh usloviyakh traektornihmi tochkami i kontrolj processa dvizheniya. *Sudovozhdenie : sb. nauchn. trudov / ONMA*. Odessa : «IzdatInform», 21, 220–227.
15. Snopkov V. I. (2004). *Upravlenie sudnom*. Sankt-Peterburg : Professional.
16. Maltsev A. S. (2020). Dynamichne pozytsionuvannia sudna pry vidkhyleniakh parametru upravlinnia, velychyna yakoho porivniana z pokhybkamy yoho vyznachennia. *Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii : naukovyi zhurnal*. Kherson : Khersonska derzhavna morskakademia, 1 (20), 44–54.
17. Golikov V. V., Maltsev S. E. (2015). Analiz vektora smetheniya puti sudna ot vetra. *Naukoviy visnik Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii : naukoviy zhurnal*. Kherson : KSMA, 1 (12), 29–35.
18. Maltsev S. E. (2021). Operatyvnyi kontrol shyryny manevrenoho zsuvu v styslykh vodakh. *Sudnovodinnia : zbirnyk naukovykh prats. NU «OMA»*. Odesa : Vydav Inform, 31, 22–37.
19. ND № 2-030101-037. *Polozhennya po klassifikacii morskikh avtonomnikh i distancionno upravlyaemikh nadvodnikh sudov (MANS)*. Sankt-Peterburg : Rosijskiy morskoy registr sudokhodstva, 2020.

Мальцев А. С. НАВИГАЦІЙНА СИСТЕМА ГАРАНТОВАНОГО БЕЗПЕЧНОГО УПРАВЛІННЯ МАНЕВРУВАННЯМ СУДІВ БЕЗ ЕКІПАЖУ

Мета роботи полягає в створенні навігаційного пристрою планування заданого шляху за подорожніми точкам координатами траекторних точок у вигляді суми матриць прямолінійних і криволінійних відрізків шляху і оперативного контролю параметрів маневрування характерних точок судна. Координати шляхових точок визначають на перетині прямолінійних відрізків рекомендованого, визначеного геодезичними способами, безпечного прямолінійного шляху на карті. Актуальною проблемою є розробка нових методів планування шляху і контролю руху по ньому з урахуванням акваторії для маневрування, маневрених властивостей судна і зовнішніх впливів для своєчасного виявлення відхилення параметрів від планових. Методи рішення проблеми: розрахунок планових координат проводиться для центру ваги судна для характерних точок шляху руху початку повороту, закінчення повороту, початку гальмування і траекторних точок прямолінійних відрізків шляху через 0,2 кбт та криволінійних ділянок через 1,5 або 10 градусів, в залежності від масштабу карти і кута повороту. Координати заданого шляху оформляються у вигляді суми лінійних матриць прямолінійних і криволінійних ділянок шляху. Навігаційна система управління рухом складається з пристроїв автоматичного визначення відхилень від планових координат і систем підтримки прийняття рішення, для коригування відхилень, що з'являються. Дослідження запропонованого методу планування і управління рухом виконано шляхом комп'ютерного моделювання та перевірки в натурних умовах, результати яких показали, що розрахована оптимальна задана траекторія забезпечує провідку центру ваги по заданому шляху засобами управління судна і відповідає встановленим критеріям оптимальності. Основною перевагою методу планування шляху руху судна по таблиці шляхових точок шляхом розрахунку координат траекторних точок за розкладкою

керма для криволінійних траєкторій, уявлення шляху у вигляді суми лінійних матриць координат прямолінійних і криво лінійних ділянок і автоматичного оперативного контролю параметрів руху. Запропонований метод може бути використаний при розробці засобів управління для автоматизованих судів з без вахтовим обслуговуванням.

Ключові слова: планування заданого шляху; траєкторні точки; матриці планових координат; автоматичне визначення відхилення; система підтримки прийняття рішення; проводка центру ваги; засоби управління для автоматизованих судів; без вахтовим обслуговування.

Maltsev A. S. NAVIGATION SYSTEM FOR GUARANTEED SAFE MANEUVERING CONTROL OF SHIPS WITHOUT A CREW

*It consists in creating a navigation device for planning a given path along waypoints with the coordinates of trajectory points in the form of the sum of matrices of straight and curved path segments and operational control of the parameters of maneuvering of the characteristic points of the vessel. Waypoint coordinates are determined at the intersection of straight segments of the recommended safe straight-line path on the map. An urgent problem is the development of new methods for planning the path and controlling movement along it, taking into account the water area for maneuvering, the maneuvering properties of the vessel and external influences for the timely detection of deviations from the planned parameters. **Methods:** Calculation of the plane coordinates is performed for the center of gravity of the vessel for the characteristic points of the movement path - the beginning of the turn, the end of the turn, the beginning of braking and the trajectory points of rectilinear sections of the path through 0.2 kbt and curved sections through 1,5 or 10 degrees, depending on the map scale and the angle of rotation. The coordinates of a given path are drawn up in the form of a sum of linear matrices of rectilinear and curved path sections. The navigation system of motion control consists of devices for automatically determining deviations from the planned coordinates and decision support systems to correct the emerging deviations. **Results:** The study of the proposed method of planning and traffic control was carried out by means of computer modeling and verification in natural conditions, the results of which showed that the calculated optimal specified trajectory provides guidance of the center of gravity along a given path by the ship's controls and meets the established optimality criteria. **Discussion:** The main advantage of the method of planning the path of the ship's movement according to the table of waypoints is by calculating the coordinates of the trajectory points along rudder shift angle for curvilinear trajectories, representation of the path in the form of a sum of linear matrices of coordinates of straight and curved linear sections and automatic operational control of motion parameters. The proposed method can be used in the development of controls for automated vessels without watch keeping.*

Keywords: *planning a given path; trajectory points; plane coordinates matrices; automatic deflection detection; decision support system; center of gravity wiring; controls for automated ships; without watch keeping service.*

© Мальцев А. С.

Статтю прийнято
до редакції 28.05.21

UDC 656.61.052

INFLUENCE HUMAN FACTOR ON SAFETY'S PLANNING ROUTE OF WATER TRANSPORT

Nosov P. S., Ph.D., associate professor, department of navigation, Kherson state maritime academy, e-mail: pason@ukr.net, ORCID: 0000-0002-5067-9766;

Zinchenko S. M., Ph.D., associate professor, ship handling department, Kherson state maritime academy, e-mail: srz56@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5012-5029;

Prokopchuk Yu. A., doctor of technical sciences, associate professor, leading researcher, department of system analysis and control problems, Institute of technical mechanics, national academy of sciences of ukraine, e-mail: itk3@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8544-1838;

Popovych I. S., doctor of psychology, professor, department of general and social psychology, Kherson state university, e-mail: ihorpopovych999@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1663-111X;

Litovchenko V. I., deep sea captain, senior lecturer, department of navigation, Kherson state maritime academy, e-mail: pason@ukr.net, ORCID: 0000-0003-1444-5425

The study is aimed at conducting a formal analysis of algorithms for captains to apply when planning routes in difficult navigation situations. Formal and algorithmic analysis based on decision trees made it possible to improve ergatic navigation safety systems and to predict potential risks of maritime accidents in a timely manner.

The article discusses approaches enabling algorithmization of processes of navigational situations perception by captains. A formal description of the most essential elements of captains' human factor affecting the route planning processes is provided. Also, the issues related to perception of difficult navigation situations by captains are considered, dependences on volume and multithreading of input information are given.

In order to confirm actual influence of captains' human factor elements on safe route planning, a number of experiments have been carried out using the Navi Trainer 5000 navigation simulator and subsequent modeling by means of Data Mining. As a result of modeling, standard designs for planning water transport routes have been obtained together with the confirmation of constructed models adequacy exemplified by the factor $F_s 3$ - «weather conditions». The proposed approaches will further expand the capabilities of predictive possible maritime accidents models due to human factor.

Keywords: water transport, human factor, planning a safe route, ergatic systems.

DOI: 10.33815/2313-4763.2021.1.24.057-070

Introduction. When carrying out route planning, the captain of vessel is guided by a wide rules range, directions and factors that allow building a safe trajectory for vessel's movement. Route Z , simultaneuosuly, as a decision-making task, is based on $x \in X$ captain's initial information about the situation, in form of which the initial stage is formed $z \in Z$ [1].

Captain's experience plays a significant role, for example, when captain's entropy is low, action plan is precisely defined z / Z , which entails detailing – $B_t(x)$ and leads to plan X_t^{\wedge} , otherwise the captain relies on experience of similar tasks Z , generalizing – $C_t(x)$ for $x \in X_t$, what $X_t \rightarrow X_{t+1}$ forms $C_t : X_t \rightarrow 2X_t$ and $B_t : X_t \rightarrow 2X_t$.

Extension of actions by generality $C_t(x)$ forms $\{Ind\} Z$ relatively domains D_j affecting focus: $D_1 \{Ind\} D_1 \rightarrow D_2 \{Ind\} D_2 \rightarrow \dots \rightarrow D_n \{Ind\} D_n$.

Detailing and generalization determine: $\forall x \in X_t, C_t(x) \cap B_t(x) = x$, within the framework of the task Z , in this case: $x' \in C_t(x) \Leftrightarrow x \in B_t(x')$ where x' is a planning feature. In this case, the activity of the captain is important: $\forall x \in X_t, e(x) \rightarrow e(C_t(x))$.

Captains act consciously, which means planning will be determined by a predicate $P(x, z)$ such that: $\forall x \in X \exists z \in Z P(x, z)$. Decisions made will be: $\forall x \in X z \in A(x) P(x, z)$ and $\forall x \in X z \notin A(x) \neg P(x, z)$, where $A: X \rightarrow 2Z$. In a critical situation, captain must accurately plan the next stage H , in relation to criterion $\Omega_t, H_t = \{x \mid x \in X_t, B_t(x) \equiv x\}$.

Captain's intuitive actions are also possible, when: $\exists x, x' \in H_t$ what $C_t(x) \cap C_t(x') = \emptyset, U_t = \emptyset$ and $\forall x \in X_t \exists! z P(x, z)$, then a situation arises: $\forall x' \in C_t(x) \cap X_t P(x', z)$.

In order to ensure proper planning, it is necessary to determine trajectory of vessel $\{x_n\} x \equiv \{x = x_0 < x_1 < \dots < x_n\} \subset X_t^{\wedge}$ without critical situation: $X_t^* = \{x^* \mid x^* \in X_t \exists! z \in Z P(x^*, z)\}$. Proceeding from this, it becomes necessary to determine model for captain's decision making [2], taking into account the planning phases that ensure safe navigation.

The purpose of the article is to formally analyze the algorithms for planning safe routes by captain in difficult navigation situations. Formal and algorithmic analysis based on decision trees will improve ergatic navigation safety systems and predict probable risks of accidents in advance.

Main research material. In order to formally describe planning process, we will define the time «codes» of captains $\forall x \in X_t^* \exists! z \in Z P(x, z)$. Three time phases of planning are considered, $X_t^{\wedge} = \bigcup z \in Z (X_t^{\wedge}) z; X_t^* = \bigcup z \in Z (X_t^*) z; \forall z \in Z (X_t^{\wedge}) z \rightarrow e(X_t^*) z$, taking into account the conditions and risks of sailing: $V = (x \rightarrow zx)$. This is specific to each captain, so any additional information $x \in X_t^{\wedge}$ may affect the planning strategy.

When planning, a priori information is formed: $\Omega_t = \{\alpha = \langle x\alpha, z\alpha \rangle \mid x\alpha \in H_t\}$, which does not imply changes in strategy. When factors arise $(X_t^*)\alpha$, preliminary route plan is changed by set rebuilding of rules-actions: $\{S^*\}\alpha = \{x^* \rightarrow z\alpha \mid x^* \in (X_t^*)\alpha\}$.

In many situations, captain does not intuitively change original itinerary plan unless it endangers safety of vessel. To change strategy W_t, Z , a precedent X_{t+1}^* must arise that changes safety of navigation:

$$\Omega_t = \{V\}0 \rightarrow W_t, Z(\{V\}0) \rightarrow W_t, Z \circ n(\{V\}0) \rightarrow W_t, Z \circ n(\{V\}0) = \{S^*\}_t, \text{Full}, \{V\}_t, \text{Full} = \bigcup k = 0, 1, 2, \dots, n W_t, Z \circ k(\{V\}0), EZ \geq 0, \text{it happens } H_t \rightarrow W_t, Z(H_t) \rightarrow W_t, Z \circ n(H_t) = X_t^*, EZ \geq 0,$$

where EZ is captain's energy and motivation.

In turn, an element of uncertainty can lead to formulation of the following formal problems class [3–6]:

$$\frac{ds}{dt} = f(s(t), s(t - \tau_1), \dots, s(t - \tau_s), d(t)) \tag{1}$$

where $s(t) = (s_1(t), \dots, s_n(t)), d(t) = (d_1(t), \dots, d_m(t)), \tau_i > 0, i = \overline{1, s}$ is boatmaster's reaction to occurrence of uncertain factors in z , where $d = d(t)$ and replanning [7].

Then system (1) can be strategically changed:

$$s(t_0) = s_0, s(t) = \varphi(t), t \in [t_0 - \max_{1 \leq i \leq z} \tau_i, t_0] \quad (2)$$

where t_0 is the moment of strategy change.

Considering planning process, we may define class of functions [8, 9] that affect range of D , which can be subject to additional restrictions related to the specifics of the route. These restrictions may encompass location, maneuverability of vessel and its characteristics, weather conditions, environmental conditions, etc. [10]. Then, in general case, condition is considered:

$$d(t) \in D \subset Y^m \quad (3)$$

where D is a set in Y^m . Considering that the main goal of planning is formalized within framework of (1), it is necessary to fulfill a number of conditions:

$$\eta_{q-i+1}(d) \geq \eta, i = \overline{1, y}, y \leq q \quad (4)$$

Here are $\eta_{q-i+1} = \eta_{q-i+1}(d), i = \overline{1, y}$ the lengths of the scheduling time intervals:

$$c(s(t)) \leq 0, t \in [t_1^i - \eta_i, t_1^i], i = \overline{1, q} \quad (5)$$

where $t_0^i = t_1^i - \eta_i, t_1^i$ are the boundary points of stages $[t_0, T]$ at which inequality is satisfied $c(s(t)) \leq 0$. The size $\eta > 0$ and number of stages $y \geq 1$ for which the planning conditions must be met (4). The interval at which inequality (5) is fulfilled is interpreted as a stage of disaster risk

reduction on route sections [11-14], relative to condition $m(t) \leq \bar{m}, t \in [t_1^i - \eta_i, t_1^i], i = \overline{1, q}$, where $m(t)$ is an indicator of the cartographic situation complexity.

It is important to take into account that with a cyclical repetition of the critical situation signs, the loss of control over vessel is possible [15]. The q, y values depend on maneuverability of vessel and its parameters. Inequalities affecting the state of navigation safety system at the moment t_1^q degree characterize the situation complexity:

$$J_i(d) = g_i(s(t_1^q)) \leq 0, i = \overline{y+1, y+\eta} \quad (6)$$

The time to reach safe state for transition to manual control $t_1(d) = t_1^q - t_0$ determines the complexity of navigation situation: $J_j(d) \leq 0, j = \overline{1, y+\eta}$.

Considering the complex navigation situation as represented by a plan with directions in the form of making managerial decisions, we will compare the position of vessel with the waypoints of route [16]. At the same time, floating targets and hazardous isobaths build the interaction field, considered in the vessel model interaction with hazardous objects.

In the case of standard Mercator cartographic projection [17], the state of frame-vessel changes depending on interaction. Interaction frame is transformed according to vector of vessel's movement relative to the cartographic location [18].

In difficult situations, planning the movement of a vessel in space can be conditionally expressed in one direction for four directions (fig. 1). It is possible that the vessel is not capable of moving in the preferred direction. This occurs when there are insurmountable cartographic obstacles on its way, constraint by vessel's draft. In these cases, the boatmaster tries to change the direction of a vessel, by choosing the way where there are minimum obstacles.

Marine transport navigators scan the situation using radar and ECDIS at a distance location r and choose direction of movement. They then observe the least amount of maritime transport,

favorable weather conditions and nonavailability of cartographic obstacles [19].

Taking into account that considered decision-making processes have a complex formalization, we can present their description in terms of the group theory mathematical system. In this case, the elements of the system will be: an alphabet or a set of objects; many words or combinations of objects, a finite set of relationships; theorems or rules of inference. As already noted, in view of the need to present the results of mathematical modeling, the theory of geometric groups is close to the description of the above principles. This theory is presented as an independent one, originating from group theory and determining the balance of the formal system [20], which is very important for streamlining the structural principles of captain's decision-making model formation.

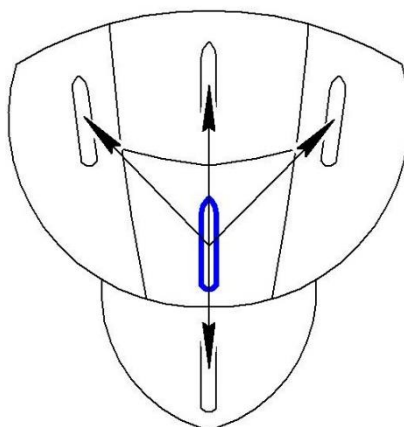


Figure 1 – Frame for moving the vessel

1. Closedness of the group. For any two elements of the group, there is a third one, which is their product, such that (7):

$$\forall a, b \in g : \exists c \in g, a \circ b = c \quad (7)$$

The axiom describes the integrity, complexity and hierarchy of constructing a vessel's trajectory, consisting of vessel control operations.

2. Group associativity for product operations. The order of operations is insignificant (8):

$$\forall a, b, c \in g : a \circ (b \circ c) = (a \circ b) \circ c = a \circ b \circ c \quad (8)$$

Axiom defines the cycle of homogeneous elements, which is aimed at achieving the ultimate goal of navigation.

3. The existence of a single element. In group there is some element e , the product of which with any element a of the group gives the same element a (9):

$$\exists e \in g : \forall a \in g, a \circ e = e \circ a = a \quad (9)$$

The axiom assumes the influence on all structural elements that have all the features of system, and comes from initial stage of route planning in form of an initial operation that determines the vessel trajectory. That is, initial strategy chosen by captain predetermines its effectiveness.

4. Existence of inverse element. For any element a of the group, there is an element a^{-1} such that their product gives the unit element e , such that (10):

$$\forall a \in g : \exists a^{-1} \in g : a \circ a^{-1} = a^{-1} \circ a = e \quad (10)$$

Axiom presupposes the repetition of vessel control operations, i.e., their reverse functions, which provides for a return to beginning of the first stage of the decision-making model.

In this context, it becomes possible to present route planning by captain in terms of geometric group theory.

In this case, we will call alphabet the finite set of planned route stages:

$$A = \left\{ \begin{array}{l} a, b, c \\ a^{-1}, b^{-1}, c^{-1} \end{array} \right\}, \text{ где } a^{-1}, b^{-1}, c^{-1} - \text{reverse alphabet according to clause 4.}$$

The group will be represented as $\langle A | R \rangle$, in which R is relationship between sets of operations leading to a single route element: $\langle a, b, c | a^2 = b = c^4 = e \rangle$ [21].

The set of elements a^x will have its own focus when planning a route, b^y and c^z therefore – alternatives. Aggregates of these sets can be represented as fragments of routes, for example $a^4 b^6$, but operating with combinations based on captain experience. By means of this formal description, two variants of groups are formed: commutative and free. Formed words represent independent decision-making trajectories that can be formed from basic elements of captain's experience. A visual display of decision-making trajectories is possible in the form of a tree that includes all actions characteristic of a given captain, thus unifying the properties of the formal system considered above [22].

Thus, it becomes possible to form an attribute space for planning and decision-making by captain in situations close to context. Connecting points in a given space makes it possible to obtain a graph, while it should be assumed that formation of graph edges is possible if next element is obtained from previous one by multiplying by one group set letters. This is logical from the position that each new element takes into account the informational component of previous one. For example, g_1 and g_2 are connected by an edge if in the alphabet $\exists a \in A; g_1 = g_2 \cdot a \Leftrightarrow g_1 \cdot a$. Thus, it becomes necessary to construct a metric space within the framework of identification the route planning models by the captain, for subsequent predictive analysis of probable critical situations.

However, it should be taken into account that formation of such a graph may be limited in terms of elements number due to increasing complexity of navigation situations perception. For example, when planning a complex route, consisting of a chain elements in form of waypoints, there is a danger of increasing information overload. This feature can be expressed in terms of p -adic systems.

Therefore, an increase in p -adicity leads to an increase in detail, and a decrease leads to generalization. Based on [1], we can conclude that the route planning process is considered within the set of internal vertices of graph $\mathbf{U}(\tau)$, between the threshold values $\{a\}$ and $\{b\}$. This makes it possible to move to nearest systems of p -adicity in ascending and descending directions, depending on situation, $\mathbf{U}(\tau) = \left[\bigcap_{j=1, \dots, n} Gv^\uparrow(\tau|a_j) \right]$.

Each route planning strategy depends on final set of situation parameters that determine the navigation conditions and possible risks:

$$Gv^\downarrow(\tau|b) = Gv^\uparrow(\tau|a) \Rightarrow \langle \tau, P \rangle_w \text{ at } Gv^\uparrow(\tau|a_i) \cap Gv^\uparrow(\tau|b_i) = \emptyset.$$

Then the transition to alternative route planning strategies is possible under conditions of the interaction balanced system between external factors and navigation experience:

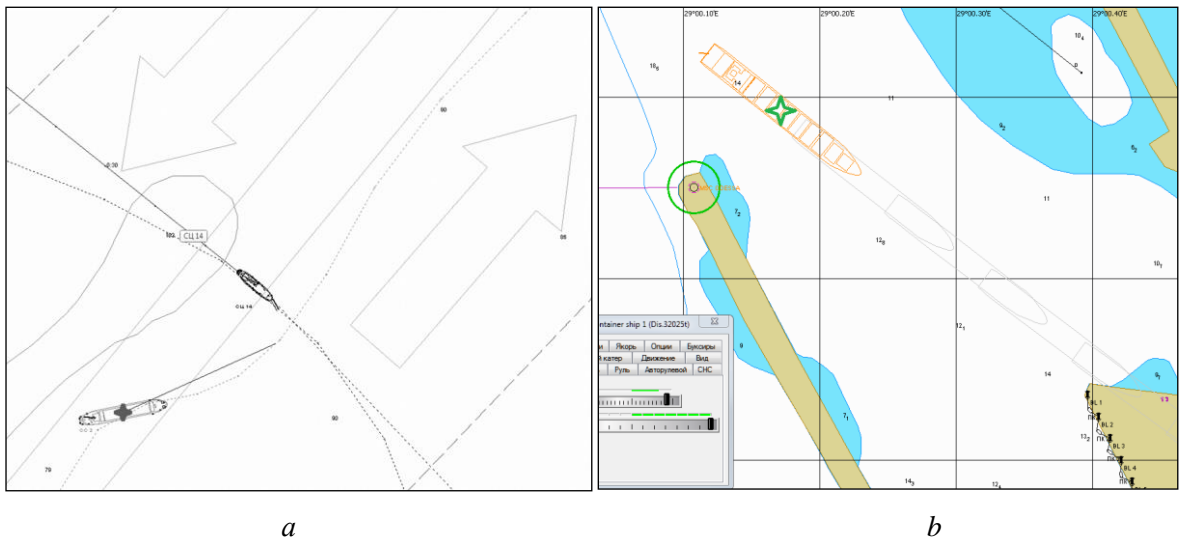
$$\forall x \in [Gv(\tau)] \Rightarrow \exists a \in \{a\}, x \in [Gv^\uparrow(\tau|a)] \& \exists b \in \{b\}, x \in [Gv^\downarrow(\tau|b)]$$

The observed balance of transition between situations in p -adic structures can depend on both: the level of complexity of navigation situation (necessity) and the operator (possibility) skill level:

$$Gv(\tau) = \bigcup_{a \in \{a\}} Gv^\uparrow(\tau|a) = \bigcup_{b \in \{b\}} Gv^\uparrow(\tau|b).$$

Based on these formal descriptions, a route planning algorithm is proposed, which is based on the navigation perception situation in the framework of p -adic systems. Let's define the metric of situation: $\rho_p(x, y) = |x - y|_p, x \rightarrow |x|_p$ [23]. At the same time, it is appropriate to assume that

p -adicity is a criterion for perception of navigation situation that allows planning a route. The main planning factor is risk of navigation hazard, which increases the risk of critical situation occurrence. Considering the complexity of the situation, captain requires to have an appropriate level of experience, each of which can be expressed in spaces $(X, \rho) \& (Y, \rho')$. Route planning for $(p = 2)$ is most consistent with simple tasks requiring switching on or off according to a given operator attribute. In turn, at $(p = 3)$, a factor is added according to principle: $\rho'(j(x_{1_{p=2}}, j|x_{2_{p=2}})) = \rho(x_{1_{p=3}}, x_{2_{p=3}})$ and transfers planning to a higher level. Thus, the problems solved in the situation space Y cannot be solved in situation space X due to changed metric (fig. 2 a, b).



a b
Figure 2 – Spaces of perception of the navigation situation Y and X with different p -adicity metrics

Fig. 1 shows that route planning in the navigation situations Y and X was influenced by different sets of information signals. This means that captains evaluated the navigation situations in a different p -adicity system, forming spaces X and Y , such that: $X \subseteq Y \mid X \setminus Y = \emptyset$.

However, it should be borne in mind that in some cases, captains deliberately resort to a «weak» planning strategy, which leads to an increase in the likelihood to critical situations with maritime transport. It is possible to describe this process formally using the approaches of subjective entropy H_π [24]:

$$H_\pi = -\sum_{i=1}^N \pi(\sigma_i) \cdot \ln \pi(\sigma_i), \text{ where } \pi^-(\sigma_i) \text{ – is weak planning strategy.}$$

Inheritance of familiar route planning approaches increases the effect of uncertainty in decision making, $\pi^-(\sigma_i) = \left(\frac{e^{-\beta L(\sigma_i)}}{\sum_{j=1}^N e^{-\beta L(\sigma_j)}} \right)$.

Experiment. Analyzing maritime accidents, one can come to the conclusion that one of the main reasons is neglect of significant navigation risks [25]. Among the significant navigation risks, the following should be noted [26]:

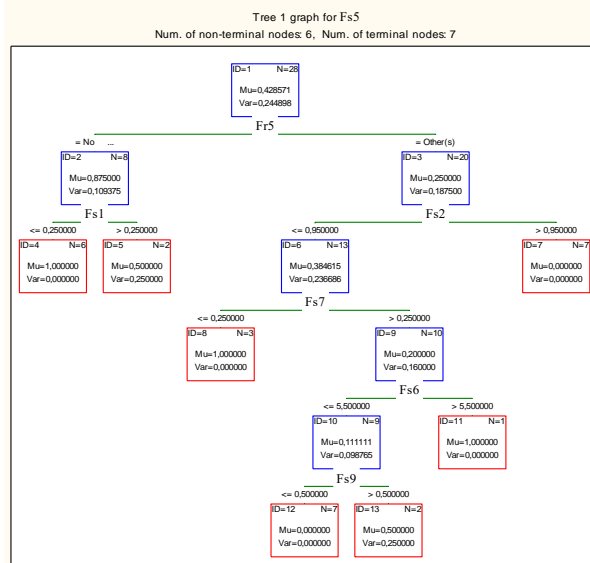
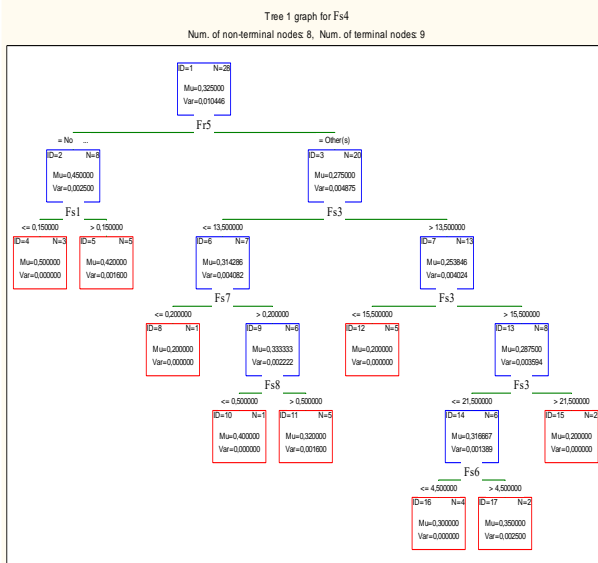
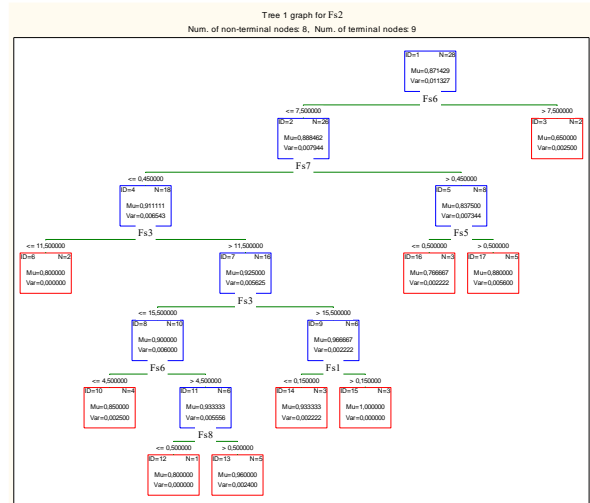
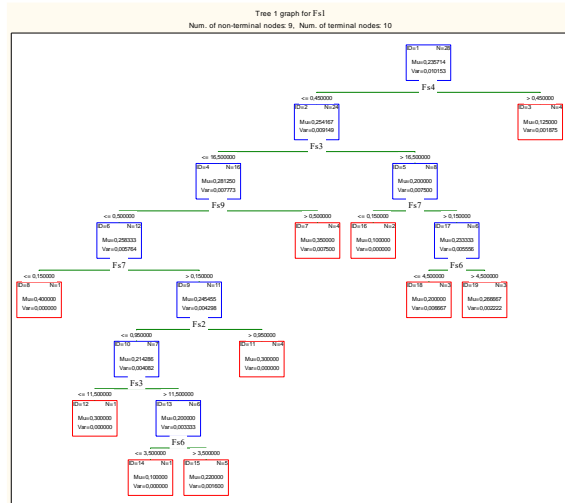
- Fs 1 – vessel maneuverability;
- Fs 2 – technogenic factors;
- Fs 3 – weather conditions;
- Fs 4 – team fatigue;
- Fs 5 – the presence of a stressful situation;
- Fs 6 – perception of the situation;
- Fs 7 – special sailing areas;

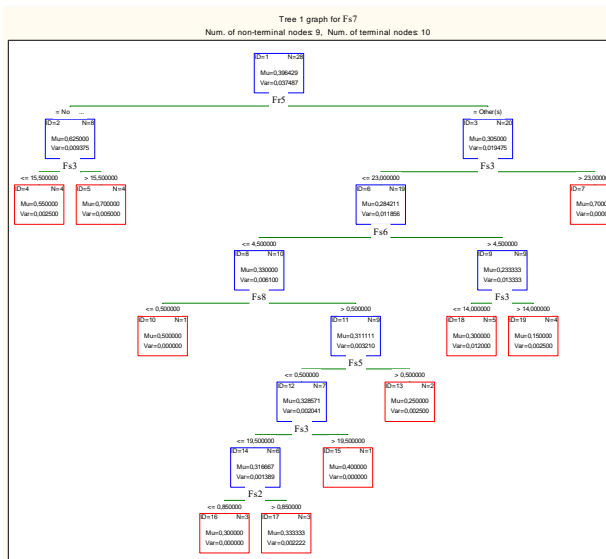
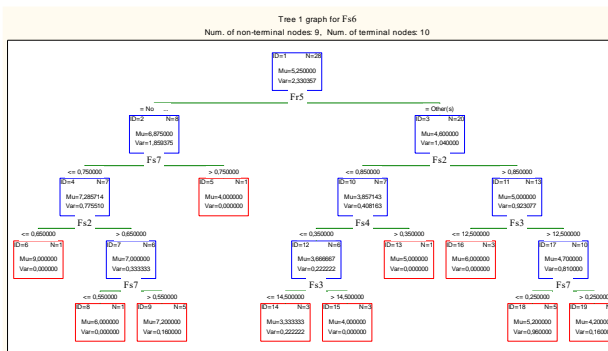
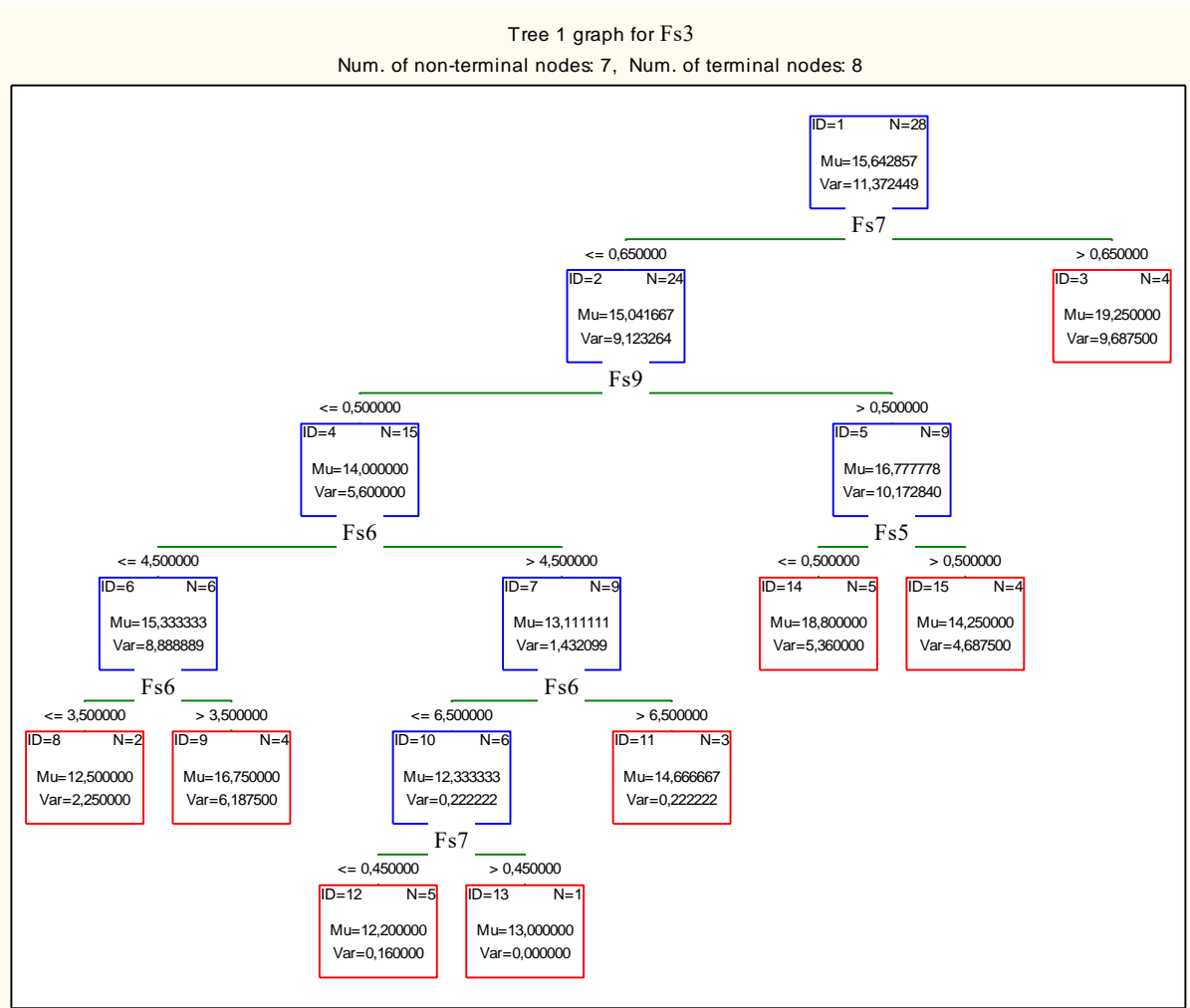
Fs 8 – quality of collaboration;

Fs 9 – automation and navigation information systems.

In order to carry out simulation modeling of possible navigation situations and manifestations of human factor, navigation simulator Navi Trainer 5000 (NTPRO 5000) and automated Data Mining tools were used.

Based on results of experiments, typical route planning trees were identified by captains under the conditions of above factors priority. As a result, with help of automated modeling technologies, control algorithms have been built in form of tree structures (fig. 3).





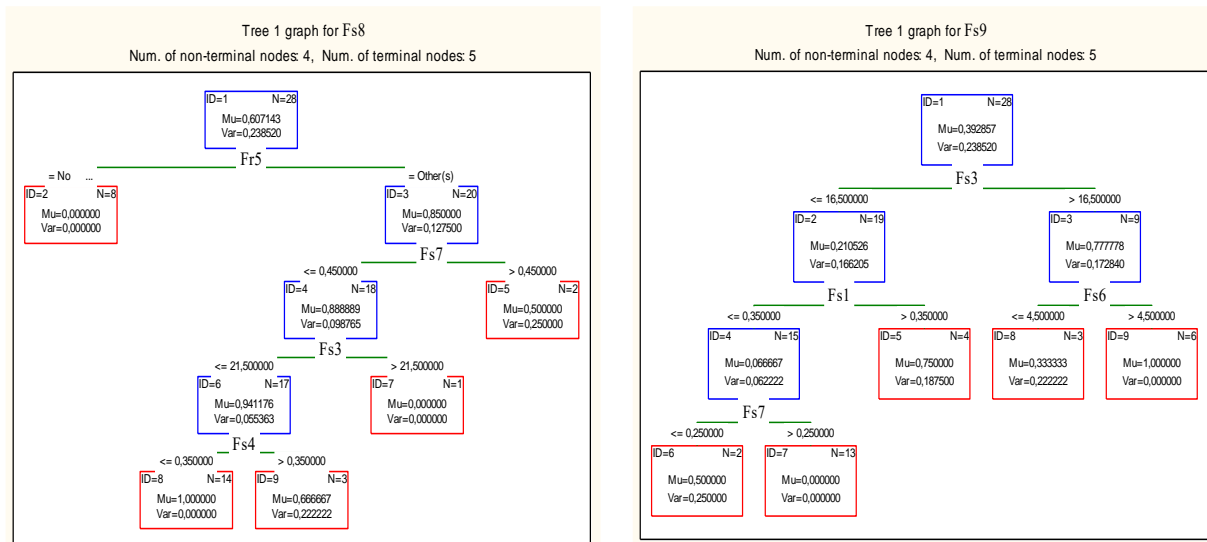


Figure 3 – Results of navigation situations simulation

In order to confirm the adequacy of the simulation, an additional experiment was carried out in which the factor **Fs 3 – weather conditions – became of special importance**. This experiment was carried out in the location of «Aegean Sea».

Description of the navigation situation. The main route for ships in Aegean Sea to enter Dardanelles Strait from the side of Kaap Maleya is through Kafirefs Strait. This is the shortest route with the most intensive traffic in Aegean Sea in its northeastern part. In the winter, from November to February, the wind strength from NE reaches 7-8 points, and the sea state up to significant – 5-6 m. Particularly unfavorable section from the Kafirefs Strait to Bozcaada Island – waiting for entrance to Dardanelles Strait. The distance to the open sea is 122 miles. In stormy weather, the vessel loses speed, the deck, hold covers and deck cargo are flooded.

To avoid stormy weather in this section, the captain’s recommendation was accepted to pave the way from Cape Maleya not to Kafirefs Strait, but to Mykonos Strait, between islands of Tinos and Mykonos, continue to the island of Chios. This is a 52-mile stretch where sea waves are much weaker during stormy weather. Moving north along the island Chios and Fr. Lesvos to about Bozcaada, the vessel will be protected from NE unrest.

The distance m. Maleya – Kafirefs – Bozcaada is 235 miles.

The distance from Malea – Mykonos – Bozcaada is 260 miles –by 25 miles more, but loss of transit time will be compensated by a smaller loss of speed from wave. By reference to meteorological situation, the ship’s captain chose a safer route (fig. 4).

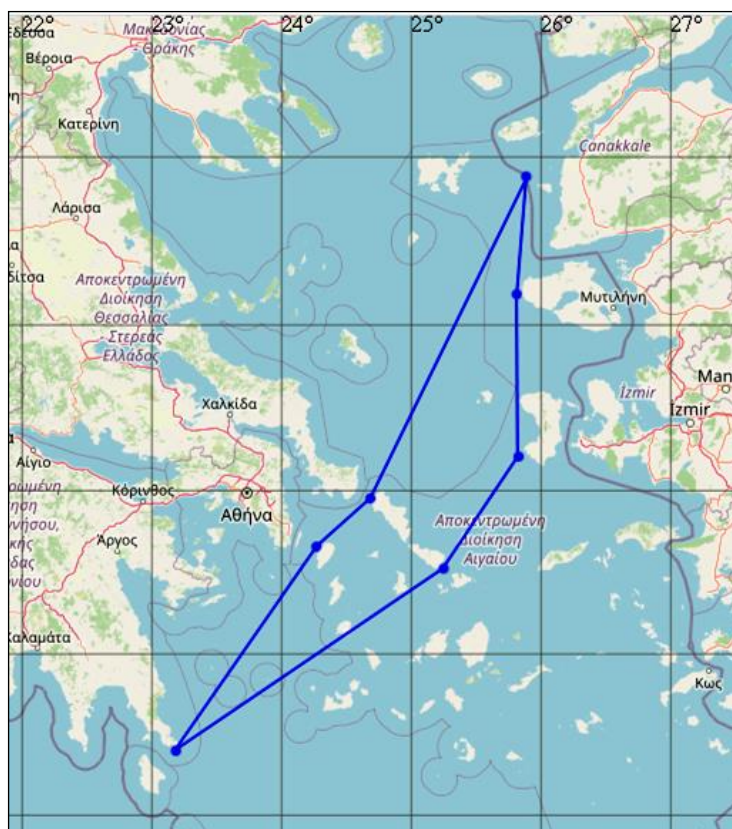


Figure 4 – The process of forming an alternative route by factor Fs 3

Conclusion. An analysis of the corresponding experimental model of route planning showed that the following became key factors for decision-making at main factor Fs 3 – “weather conditions»:

Fs 7 – «special navigation areas» → Fs 9 – «automation and navigation information systems» → Fs 6 – «perception of situation» & Fs 5 – «presence of a stressful situation» → Fs 6 – «perception of situation» → Fs 7 – «special sailing areas ».

As can be seen from the route planning algorithm, the most significant planning factors were Fs 6 – the perception of situation and Fs 7 – “special navigation areas», which appeared cyclically throughout the planning process.

In addition, an important role has been played by Fs 5 – «the presence of a stressful situation», which, with sufficient influence, can significantly affect course of events. However, the elimination of this factor in the short term is almost impossible and requires additional training at time of training [27].

REFERENCES

1. Prokopchuk Y. A. (2017). Sketch of the Formal Theory of Creativity: monograph. Dnepr : PSACEA Press. 452 p.
2. Носов П.С., Тонконогий В.М., Яковенко О.Є. Застосування адаптивних функцій для впливу на модель знань студента. *Труди Одеського політехнічного університету*. Одеса : ОНПУ. Вып.1 (25). 2006. С. 118–122.
3. Popovych I. S., Cherniavskiy V. V., Dudchenko S. V., Zinchenko S. M., Nosov P. S., Yevdokimova O. O., Burak O. O. & Mateichuk V. M. Experimental Research of Effective «The Ship’s Captain and the Pilot» Interaction Formation by Means of Training Technologies, 2020. *Revista ESPACIOS*, Vol. 41(№11). 30 p.

4. Nosov P. S., Zinchenko S. M., Popovych I. S., Ben A. P., Nahrybelnyi Y. A., Mateichuk V. M. Diagnostic system of perception of navigation danger when implementation complicated maneuvers. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2020. № 1. P. 146–161. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-1-15>.
5. Nosov P., Zinchenko S., Popovych I., Safonov M., Palamarchuk I., Blakh V. Decision support during the vessel control at the time of negative manifestation of human factor. *CEUR Workshop Proceedings*, 2608, 2020. P. 12–26.
6. Buldaev A. S. Control over oscillations in delayed systems for modeling of diseases. *Math modeling*. 1991. Vol. 3, Issue 6. P. 10–21.
7. Zinchenko S. M., Ben A. P., Nosov P. S., Popovich I. S., Mamenko P. P., Mateichuk V. M. Improving the Accuracy and Reliability of Automatic Vessel Motion Control System. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2020. № 2. P. 183–195. DOI: [10.15588/1607-3274-2020-2-19](https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-2-19)
8. Lupini M. Fraïssé limits in functional analysis. *Advances in Mathematics*. 2018. Vol. 338. P. 93–174. DOI: [10.1016/j.aim.2018.08.012](https://doi.org/10.1016/j.aim.2018.08.012).
9. Fujimoto K. Classes and truths in set theory. *Annals of Pure and Applied Logic*. 2012, Vol. 163(11), P. 1484–1523. DOI: [10.1016/j.apal.2011.12.006](https://doi.org/10.1016/j.apal.2011.12.006).
10. Kastrisios C., Pilikou M. Nautical cartography competences and their effect to the realization of a worldwide Electronic Navigational Charts database, the performance of ECDIS and the fulfilment of IMO chart carriage requirements. *Marine Policy*. 2017. Vol. 75, P. 29–37. DOI: [10.1016/j.marpol.2016.10.007](https://doi.org/10.1016/j.marpol.2016.10.007).
11. Pengfei Chen, Yamin Huang, Junmin Mou, P.H.A.J.M. van Gelder: Ship collision candidate detection method: A velocity obstacle approach. *Ocean Engineering*. Vol. 170, P 186-198. DOI: [10.1016/j.oceaneng.2018.10.023](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.10.023).
12. Liu Yan, Frangopol Dan M. (2018). Probabilistic risk, sustainability, and utility associated with ship grounding hazard. *Ocean Engineering*. 154, 311–321, doi: [10.1016/j.oceaneng.2018.01.101](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.01.101).
13. Nosov P. S., Cherniavskiy V. V., Zinchenko S. M., Popovych I. S., Nahrybelnyi Ya. A., Nosova H. V. (2021). Identification of marine emergency response of electronic navigation operator. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. № 1. P. 208–223. DOI: [10.15588/1607-3274-2021-1-20](https://doi.org/10.15588/1607-3274-2021-1-20).
14. Nosov P., Ben A., Zinchenko S., Popovych I., Mateichuk V., Nosova H. (2020). Formal approaches to identify cadet fatigue factors by means of marine navigation simulators. *CEUR Workshop Proceedings*. C. 823–838.
15. Nosov P. S., Popovych I. S., Cherniavskiy V. V., Zinchenko S. M., Prokopchuk Y. A., Makarchuk D. V. (2020). Automated identification of an operator anticipation on marine transport. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. № 3. P 158–172.
16. Степанцов М. Е. Математическая модель направленного движения группы людей. Математическое моделирование. 2004. Вып. 3. С 43–49.
17. Maling D. H. (1992). The Transverse Mercator projection. *Coordinate Systems and Map Projections*. 336-363. DOI: [10.1016/B978-0-08-037233-4.50021-2](https://doi.org/10.1016/B978-0-08-037233-4.50021-2).
18. Zinchenko S. M., Nosov P. S., Mateichuk V. M., Mamenko P. P., Grosheva O. O. Use of navigation simulator for development and testing ship control systems. МНПК пам'яті професорів Фоміна Ю. Я. і Семенова В. С. (FS – 2019), 24–28 квітня 2019, Одеса – Стамбул – Одеса. P. 350–355.
19. Bole A., Wall A., Norris A. (2014). Navigation Techniques Using Radar and ARPA. *Radar and ARPA Manual*. Butterworth-Heinemann. P. 371–405. doi: [10.1016/B978-0-08-097752-2.00008-8](https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097752-2.00008-8).
20. Al-Noor T. & Al-Obaidi, O. (2013). The course of lectures on Symmetry and group theory. University of Baghdad.
21. Glasner S. (1974). Topological dynamics and group theory. *Trans. Amer. Math. Soc.*, Vol. 187, 327–334.

22. Malyutin A. (2020). Geometric group theory. Retrieved from <https://www.lektorium.tv/node/32971>.
23. Harris M. Speculations on the mod p representation theory of p -adic groups / M. Harris *Annales de la faculté des sciences de Toulouse Mathématiques*, 2016. T. 25. Vol. 2–3. P. 403–418. DOI: 10.5802/afst.1499.
24. Kasianov V. Subjective entropy of preferences. *Subjective analysis*. Warsaw, Poland: Institute of aviation, 2013. 644 p.
25. Li Bo & Tian, Haonan & Yi, Huawei & Li, Xiaohui. (2020). Innovative Decision and Forecasting Approach on Navigation Risk. *IEEE Access*. P. 1-1. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3016720.
26. Hetherington C., Flin K. (2006). Safety in shipping: The human element. Mearns. *Journal of safety research*. Vol. 37, Is. 4. P. 401–411. DOI: 10.1016/j.jsr.2006.04.007.
27. Popovych I. S.; Blynova O. Ye., Aleksieieva M. I., Nosov P. S., Zavatska N. Ye. & Smyrnova O. O. (2019). Research of Relationship between the Social Expectations and Professional Training of Lyceum Students studying in the Field of Shipbuilding. *Revista ESPACIOS*. Vol. 40 (33). 21 p.

REFERENCES

1. Prokopchuk Y. A. (2017). *Sketch of the Formal Theory of Creativity*: monograph. Dnepr : PSACEA Press.
2. Nosov P. S., Tonkonohyi V. M., Yakovenko O. Ye. (2006). Zastosuvannia adaptivnykh funktsii dlia vplyvu na model znan studenta . *Trudih Odesskogo politekhnicheskogo universiteta*. Odessa : ONPU. Vol.1 (25), 118–122.
3. Popovych I. S., Cherniavskiy V. V., Dudchenko S. V., Zinchenko S. M., Nosov P. S., Yevdokimova O. O., Burak O. O. & Mateichuk V. M. (2020). Experimental Research of Effective «The Ships Captain and the Pilot» Interaction Formation by Means of Training Technologies, 2020. *Revista ESPACIOS*, Vol. 41 (11).
4. Nosov P. S., Zinchenko S. M., Popovych I. S., Ben A. P., Nahrybelnyi Y. A., Mateichuk V. M. (2020). Diagnostic system of perception of navigation danger when implementation complicated maneuvers. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. Vol. 1, 146-161. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-1-15>.
5. Nosov P., Zinchenko S., Popovych I., Safonov M., Palamarchuk I., Blakh V. (2020). Decision support during the vessel control at the time of negative manifestation of human factor. *CEUR Workshop Proceedings*, 2608, 12–26 .
6. Buldaev A. S. (1991). Control over oscillations in delayed systems for modeling of diseases. *Math modeling*. Vol. 3, Issue 6, 10–21.
7. Zinchenko S. M., Ben A. P., Nosov P. S., Popovich I. S., Mamenko P. P., Mateichuk V. M. (2020). Improving the Accuracy and Reliability of Automatic Vessel Motion Control System. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. Vol. 2, 183–195. DOI: 10.15588/1607-3274-2020-2-19
8. Lupini M. Fraïssé limits in functional analysis. *Advances in Mathematics*. 2018. Vol. 338. P. 93–174. DOI: 10.1016/j.aim.2018.08.012.
9. Fujimoto K. (2012). Classes and truths in set theory. *Annals of Pure and Applied Logic*. Vol. 163 (11), P. 1484–1523. DOI: 10.1016/j.apal.2011.12.006.
10. Kastrisios C., Pilikou M. (2017). Nautical cartography competences and their effect to the realization of a worldwide Electronic Navigational Charts database, the performance of ECDIS and the fulfilment of IMO chart carriage requirements. *Marine Policy*. Vol. 75, P. 29–37. doi:10.1016/j.marpol.2016.10.007
11. Pengfei Chen, Yamin Huang, Junmin Mou, P.H.A.J.M. van Gelder. (2018). Ship collision candidate detection method: A velocity obstacle approach. *Ocean Engineering*. 170, 186–198. doi:10.1016/j.oceaneng.2018.10.023

12. Liu Yan, Frangopol Dan M. (2018). Probabilistic risk, sustainability, and utility associated with ship grounding hazard. *Ocean Engineering*. 154, 311–321. doi:10.1016/j.oceaneng. 2018.01.101
13. Nosov P. S., Cherniavskiy V. V., Zinchenko S. M., Popovych I. S., Nahrybelnyi Ya. A., Nosova H. V. (2021). Identification of marine emergency response of electronic navigation operator. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. Vol. 1, 208–223. DOI:10.15588/1607-3274-2021-1-20
14. Nosov P., Ben A., Zinchenko S., Popovych I., Mateichuk V., Nosova H. (2020). Formal approaches to identify cadet fatigue factors by means of marine navigation simulators. *CEUR Workshop Proceedings*. 823–838.
15. Stepancov M. E. (2004). Matematicheskaya modelj napravlenogo dvizheniya gruppiv lyudey. Matematicheskoe modelirovanie.
16. Nosov P. S., Popovych I. S., Cherniavskiy V. V., Zinchenko S. M., Prokopchuk Y. A., Makarchuk D. V. (2020). Automated identification of an operator anticipation on marine transport. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. Vol. 3, 158172
17. Maling D. H. (1992). The Transverse Mercator projection. *Coordinate Systems and Map Projections*. Pergamon. 336–363. DOI:10.1016/B978-0-08-037233-4.50021-2
18. Zinchenko S. M., Nosov P. S., Mateichuk V. M., Mamenko P. P., Grosheva O. O. (2014). Use of navigation simulator for development and testing ship control systems. *MNPK pamiati profesora Yu. Ya. i Semenova V. S. (FS – 2019)*, 350355.
19. Bole A., Wall A., Norris A. (2014). Navigation Techniques Using Radar and ARPA. Radar and ARPA Manual. *Butterworth-Heinemann*, 371–405, DOI:10.1016/B978-0-08-097752-2.00008-8
20. Al-Noor T. & Al-Obaidi, O. (2013). *The course of lectures on Symmetry and group theory*. University of Baghdad.
21. Glasner S. (1974). Topological dynamics and group theory. *Trans. Amer. Math. Soc.*, Vol. 187, 327–334.
22. Malyutin A. (2020). Geometric group theory. Retrieved from <https://www.lektorium.tv/node/32971>.
23. Harris M. Speculations on the mod p representation theory of p-adic groups / M. Harris *Annales de la faculté des sciences de Toulouse Mathématiques*, 2016. T. 25. Vol. 2–3. P. 403–418. DOI: 10.5802/afst.1499.
24. Kasianov V. Subjective entropy of preferences. *Subjective analysis*. Warsaw, Poland: Institute of aviation, 2013. 644 p.
25. Li Bo & Tian, Haonan & Yi, Huawei & Li, Xiaohui. (2020). Innovative Decision and Forecasting Approach on Navigation Risk. *IEEE Access*. 1-1. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3016720.
26. Hetherington C., Flin K. (2006). Safety in shipping: The human element. Mearns. *Journal of safety research*. Vol. 37, Is. 4, 401–411. DOI: 10.1016/j.jsr.2006.04.007.
27. Popovych I. S., Blynova O. Ye., Aleksieieva M. I., Nosov P. S., Zavatska N. Ye. & Smyrnova O. O. (2019). Research of Relationship between the Social Expectations and Professional Training of Lyceum Students studying in the Field of Shipbuilding. *Revista ESPACIOS*. Vol. 40 (33). 21 p.

Носов П. С., Зинченко С. М., Прокопчук Ю. А., Попович И. С., Литовченко В. И. ВЛИЯНИЕ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА НА БЕЗОПАСНОСТЬ ПЛАНИРОВАНИЯ МАРШРУТА ВОДНОГО ТРАНСПОРТА

Целью статьи является формальный анализ алгоритмов планирования капитаном безопасных маршрутов в сложных навигационных ситуациях на водном транспорте. Формальный и алгоритмический анализы на основе деревьев принятия решений позволил усовершенствовать эргатические системы навигационной безопасности и заранее спрогнозировать вероятные риски морских аварий.

В статье рассматриваются подходы, позволяющие алгоритмизировать процессы восприятия навигационных ситуаций капитаном. При этом приводится формальное описание наиболее существенных элементов человеческого фактора капитана, влияющих на процессы планирования маршрутов. Также рассматриваются вопросы, связанные с восприятием сложных навигационных ситуаций капитаном, приводятся зависимости от объема и многопоточности входной информации. С целью подтверждения фактического влияния элементов человеческого фактора капитана на процессы планирования безопасного маршрута был проведен ряд экспериментов с применением навигационного симулятора Navi Trainer 5000 и последующего моделирования средствами Data Mining. В результате моделирования были получены типовые конструкции планирования маршрутов водного транспорта. А также подтверждение адекватности построенных моделей на примере фактора $F_s 3$ – «погодные условия». Предложенные подходы позволят в дальнейшем расширить возможности прогностических моделей возможных аварий на водном транспорте по вине человеческого фактора.

Ключевые слова: водный транспорт, человеческий фактор, планирование безопасного маршрута, эргатические системы.

Носов П. С., Зінченко С. М., Прокопчук Ю. А., Попович І. С., Литовченко В. І. ВПЛИВ ЛЮДСЬКОГО ФАКТОРУ НА БЕЗПЕКУ ПЛАНУВАННЯ МАРШРУТУ ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ

Метою статті є формальний аналіз алгоритмів планування капітаном безпечних маршрутів у складних навігаційних ситуаціях на водному транспорті. Формальний і алгоритмічний аналізи на основі дерев прийняття рішень дозволив удосконалити ергатичні системи навігаційної безпеки і заздалегідь спрогнозувати ймовірні ризики морських аварій.

У статті розглядаються підходи, що дозволяють алгоритмізувати процеси сприйняття навігаційних ситуацій капітаном. Водночас наводиться формальний опис найбільш істотних елементів людського фактору капітана, що впливають на процеси планування маршрутів. Також розглядаються питання, що пов'язані із сприйняттям складних навігаційних ситуацій капітаном, наводяться залежності від обсягу і багатопоточності вхідної інформації.

З метою підтвердження фактичного впливу елементів людського фактору капітана на процеси планування безпечного маршруту була проведена низка експериментів із застосуванням навігаційного симулятора Navi Trainer 5000 і подальшого моделювання засобами Data Mining. В результаті моделювання були отримані типові конструкції планування маршрутів водного транспорту. А також підтверджено адекватність побудованих моделей на прикладі фактору $F_s 3$ – «погодні умови». Запропоновані підходи дозволять у подальшому розширити можливості прогностичних моделей можливих аварій на водному транспорті з вини людського фактору.

Ключові слова: водний транспорт, людський фактор, планування безпечного маршруту, ергатичні системи.

© Носов П. С., Зінченко С. М., Прокопчук Ю. А., Попович І. С., Литовченко В. І.

Статтю прийнято
до редакції 02.05.21

ІНЖЕНЕРІЯ У ТРАНСПОРТНІЙ ГАЛУЗІ

ENGINEERING IN TRANSPORT INDUSTRY

ВИКОРИСТАННЯ ІННОВАЦІЙНИХ ПОЛІМЕРКОМПОЗИТНИХ ПОКРИТТІВ З МЕТОЮ ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ СУДНОВОДІННЯ

Безбах О. М., к.т.н., старший викладач кафедри інноваційних технологій та технічних засобів судноводіння Херсонської державної морської академії, ORCID: 0000-0002-8086-328, e-mail: ombezba@gmail.com

Показано, що серед численних полімерних матеріалів найбільше практичне застосування в галузі суднобудування знаходять реактопласти на основі епоксидних зв'язувачів, такий вибір зумовлений цілим комплексом експлуатаційних та функціональних характеристик останніх. Одним з основних та найсучасніших засобів регулювання структури та властивостей епоксидних композитних матеріалів є їх фізична модифікаційного нанонаповнювачами різної природи. На основі експериментальних досліджень вивчено вплив фізико-хімічної модифікаційної добавки у вигляді пігментної газової сажі, розмір часток якої становить 24 ± 2 нм, на теплофізичні властивості епоксидного діанового олігомера марки ЕД - 20. У результаті аналізу отриманих даних встановлено, що введення пігментної газової сажі в кількості $q = 1,00$ мас.ч. призводить до значного зниження усадки КМ від $\delta = 0,032$ % (для вихідної матриці) до $0,019$ % відповідно. Доведено, що з подальшим збільшенням концентрації добавки в епоксидну матрицю ($q = 25,00$ мас.ч.) відповідні показники δ КМ зменшуються несуттєво. Це опосередковано свідчить про те, що введення нанодисперсних часток газової сажі за оптимального вмісту забезпечує максимальне зшивання композиції та зумовлює підвищення як механічних, так і теплофізичних властивостей сформованих композитів. Розроблено нові НКМ та покриття на їх основі для відновлення і підвищення експлуатаційних характеристик технічних засобів судноводіння, конструкцій та механізмів морського та річкового транспорту.

Ключові слова: епоксидний композит, фізична модифікація, нанонаповнювач, теплофізичні властивості, концентрація, усадка, надійність, експлуатація, морські транспортні засоби.

DOI: 10.33815/2313-4763.2021.1.24.072–081

Постановка проблеми. Інтенсивна глобалізація торгівлі призводить до безперервного збільшення кількості морських суден, їх розмірів, швидкості руху, завдяки чому постійно нарощуються обсяги вантажоперевезень у світі. Це зокрема активно впливає на підвищення старих та створення нових вимог безпеки мореплавства, яка значною мірою залежить від справної роботи морських транспортних засобів. У цьому полягають як технічні, так і економічні передумови виникнення проблеми надійності [1]. Так як недостатній рівень надійності – це додаткові витрати, викликані аваріями і простоями суден, зниженням їх швидкості і збільшенням часу вантажних операцій, а також додаткові витрати на ремонт і ТО обладнання. Вирішення цієї проблеми полягає у забезпеченні справної роботи всіх складових судна під час рейсу та збільшення його міжремонтного періоду роботи. Відомо, що до технічної експлуатації морських суден відноситься низка технологічних процесів [2–4]: технічне використання (забезпечення роботи судна), технічне обслуговування (підтримання судна в належному (робочому) стані), ремонтні роботи (відновлення справного технічного стану). Кожен із зазначених технологічних процесів забезпечує надійність експлуатації судна і вимагає безперервного розвитку і вдосконалення.

Нині, для ремонтних заходів та підтримки суднових пристроїв у робочому стані активно використовують інноваційні полімер-композитні матеріали (ПКМ) [5], які дозволяють захистити робочі поверхні суднового устаткування від впливу різноманітних експлуатаційних факторів, таких як: сонячна радіація, морська вода, атмосферні опади, а також механічні навантаження, викликані штормами. Це також дає можливість підвищити експлуатаційні характеристики технічних засобів судна, зокрема і особливо важливі, що відповідають за його управління [6–8].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Загальновідомо [9–11], що одним з найбільших споживачів синтетичних полімерних матеріалів є сучасна суднобудівна промисловість, де перспективи їх використання практично необмежені. Також, серед

численних полімерних матеріалів найбільше практичне застосування в цій галузі знаходять реактопласти на основі епоксидних зв'язувачів, що зумовлено цілим комплексом експлуатаційних та функціональних характеристик останніх. Що підтверджується постійним зростанням кількості публікацій цієї тематики, як у закордонних, так і вітчизняних журналах [9–16]. Аналіз наведених вище праць дозволяє стверджувати, що одним із найперспективніших засобів регулювання структури та властивостей полімерних композитів залишається фізична модифікація епоксидної матриці, яка дозволяє значно покращувати основні адгезійні, термодформаційні та експлуатаційні характеристики розроблених матеріалів. У цьому аспекті одним з найбільш дієвих і ефективних способів модифікації епоксикомпозитів вважається цілеспрямоване введення в їх структуру нанонаповнювачів різної природи. Тому, актуальним є проведення досліджень впливу концентрації нанодисперсної сажі на теплофізичні властивості епоксидної матриці.

Мета роботи. Дослідити вплив нанодисперсної сажі на теплофізичні властивості епоксидної матриці для формування захисних покриттів із підвищеними експлуатаційними характеристиками.

Матеріали та методика дослідження. Як основний компонент для зв'язувача при формуванні КМ вибрано епоксидний діановий олігомер марки ЕД–20 (ГОСТ 10587-84).

Для зшивання епоксидних композицій використано низькомолекулярний твердник поліетиленполіамін $[-CH_2-CH_2-NH-]_n$ (ТУ 6-05-241-202-78), що дозволяє затверджувати матеріали при кімнатних температурах. Зшивали КМ, вводячи твердник поліетиленполіамін (ПЕПА) у композицію при стехіометричному співвідношенні компонентів за вмісту (мас.ч.) – ЕД-20: ПЕПА – 100: 10.

У вигляді фізико-хімічної модифікаційної добавки застосовували нанодисперсну пігментну газову сажу марки PowCarbon 2419G (CAS NO.: 1333-86-4, EINECS NO.: 215-609-9). Розмір часток порошку визначено за допомогою методу електронної мікроскопії і становить 24 ± 2 нм.

Епоксидні КМ формували за технологією, наведеною у праці [17].

У роботі досліджували теплофізичні властивості КМ, а саме: термічний коефіцієнт лінійного розширення та розраховані на його основі температура склування й усадка.

Термічний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР) матеріалів розраховували за кривою залежності відносної деформації від температури, апроксимуючи цю залежність експоненціальною функцією. Відносну деформацію визначали за зміною довжини зразка при підвищенні температури у стаціонарних умовах (ГОСТ 15173-70). Розміри зразків для дослідження: $65 \times 7 \times 7$ мм, непаралельність шліфованих торців складала не більше 0,02 мм. Перед дослідженням вимірювали довжину зразка з точністю $\pm 0,01$ мм. Швидкість підвищення температури становила $v = 2$ К/хв.

Відхилення значень при дослідженнях показників теплофізичних властивостей КМ (ТКЛР) становило 4...6 % від номінального.

Обговорення результатів експерименту. Захисні покриття, що наносяться на відновлювані поверхні, повинні володіти безліччю властивостей, що забезпечують надійну роботу деталей і суттєво підвищують їх довговічність. До таких властивостей ПКМ відносяться: міцність з'єднання з основою (адгезія), фізико-механічні властивості, зносостійкість, втомна міцність і не менш важливі теплофізичні характеристики. Внаслідок того, що полімерні покриття застосовуються в основному для захисту металевих деталей, найважливішою умовою їх спільного використання є досить близьке співвідношення коефіцієнтів термічного розширення вище зазначених матеріалів. Крім того, відомо [18], що підвищені значення ТКЛР полімерів є джерелом значних внутрішніх напружень, які виникають у структурі захисних покриттів при зміні температури. Саме тому дослідження теплового коефіцієнта лінійного розширення (α) має важливе значення як метод вивчення властивостей розроблених ПКМ.

Отже, на початковому етапі за допомогою аналізу дилатометричних кривих (рис. 1) досліджували тепловий коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР) розроблених епоксидних

нанокомпозитів. Як видно з рисунку 2 величина ТКЛР вищезазначених матеріалів зі збільшенням температури зростає. В той же час розрахунки заздалегідь заданих температурних діапазонів (рис. 2) ($T = (303...473) \pm 2 \text{ K}$) показують, що найменшим значенням ТКЛР серед усього спектра досліджуваних композитів характеризуються ПКМ з концентрацією нанодисперсної газової сажі (в подальшому НДГС), яка становить $q = 5,00...15,00$ мас.ч. Значення ТКЛР відповідних матеріалів у температурному діапазоні $T = (303...373) \pm 2 \text{ K}$ коливається в межах $\alpha = (2,24...3,47) \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. Підкреслимо, що при зростанні температури до $\Delta T = (423...473) \pm 2 \text{ K}$ в області лінійного розширення зразки з вищеописаним вмістом наповнювача ($q = 15,00 \dots 25,00$ мас.ч.) також характеризуються найменшими показниками ТКЛР – $\alpha = (5,29...5,83) \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ й $\alpha = (10,02...10,04) \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ відповідно.

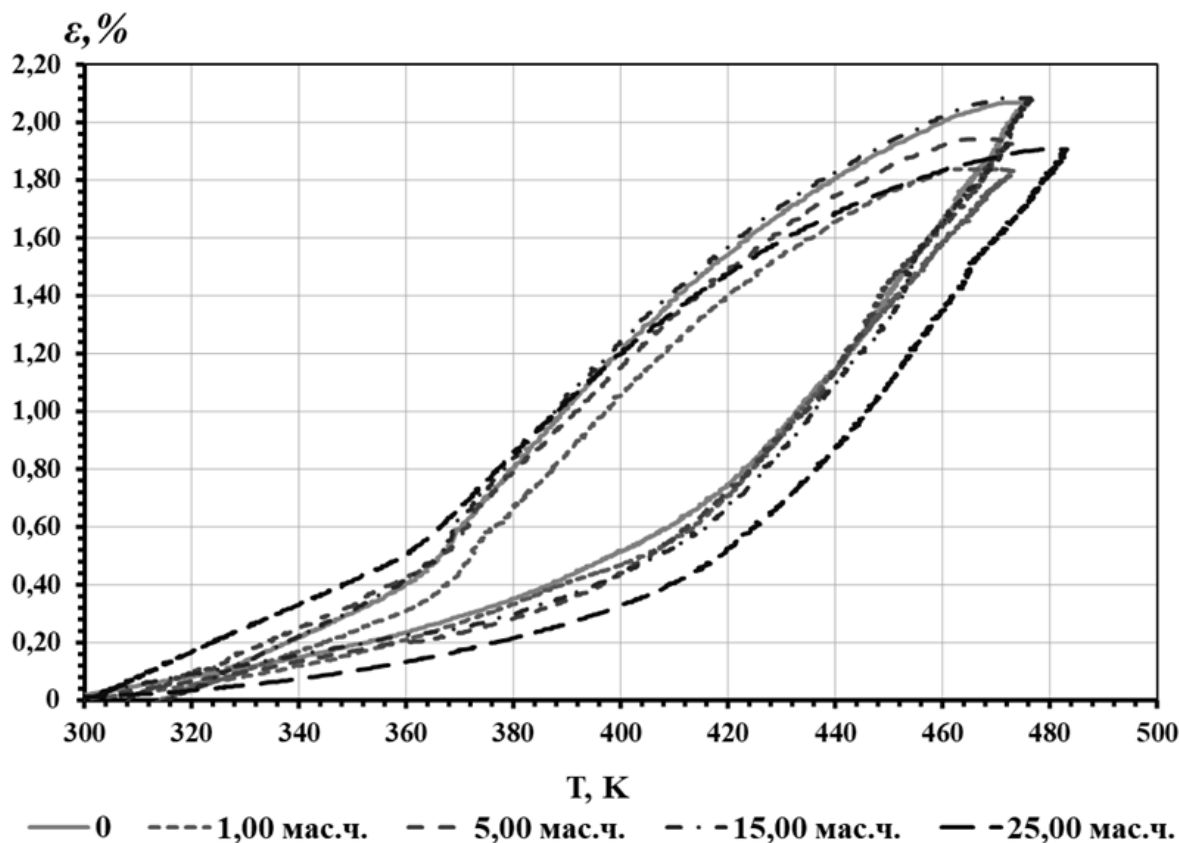


Рисунок 1 – Дилатометричні криві ПКМ із різним умістом нанодисперсного наповнювача НДГС, q , мас.ч.

Окремо треба звернути увагу на ПКМ з концентрацією НДГС у кількості $q = 5,00$ мас.ч. Зазначимо, що ці композити мають характеристики ТКЛР, які суттєво відрізняються від найменших показників, отриманих за вищезазначеного вмісту наповнювача. Експериментально доведено, що при введенні НДГС у кількості $q = 5,00$ мас.ч. (рис. 2) розроблені композити в наступному температурному діапазоні – $T = (303...373) \pm 2 \text{ K}$ характеризуються такими значеннями ТКЛР – $\alpha = (3,27...3,78) \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, у той же час при підвищеннях температур в області лінійного розширення $T = (423...473) \pm 2 \text{ K}$ їх показники коливаються в межах $\alpha = (5,68...10,12) \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

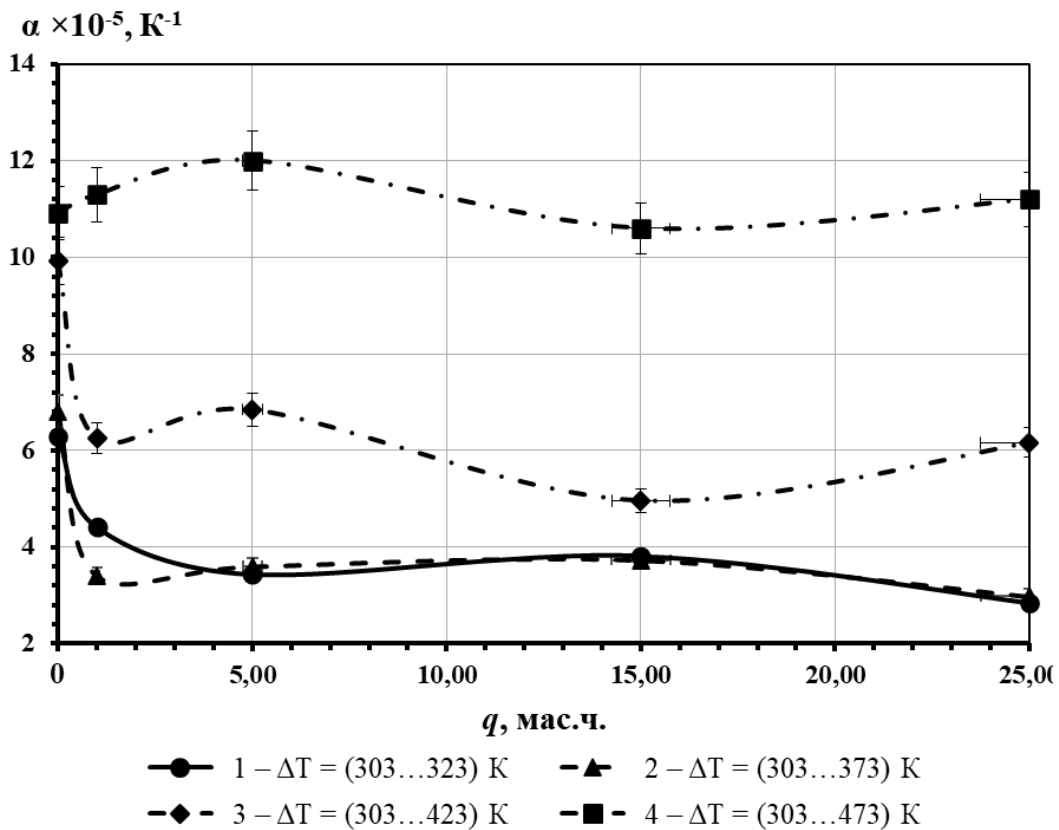


Рисунок 2 – Залежність теплового коефіцієнта лінійного розширення (ТКЛР) від вмісту наповнювача НДГС за різних температурних діапазонів

Підсумовуючи з отримані результати експериментальних досліджень, треба зазначити, що введення часток НДГС в епоксидний олігомер за вмісту $q = 5,00...25,00$ мас.ч. призводить до значного зменшення ТКЛР у наступному температурному діапазоні – $T = 303...423$ К, на $\Delta\alpha = 48...68\%$ та $\Delta\alpha = 41...46\%$ відповідно, порівнюючи з матричними даними. Також зазначимо, що такі матеріали демонструють незначні зміни ТКЛР ($\Delta\alpha = 0,86...0,98\%$) під дією максимально заданого теплового поля ($T = 473$ К). Це, також свідчить про те, що модифікація епоксидної матриці добавкою НДГС за умови вищезазначеного діапазону концентрацій ($q = 5,00...25,00$ мас.ч.) суттєво впливає на формування сітчастої будови полімеру, де завдяки рівномірно розподіленим у його об'ємі наночасткам значно ущільнюється та зміцнюється просторова структура створених матеріалів. Завдяки цьому відбувається обмеження рухливості ланцюгів епоксидного зв'язувача, що приводить до зменшення ТКЛР, і як наслідок, забезпечує стійкість отриманих ПКМ або захисних покриттів до лінійних деформацій у наступному діапазоні температур – $T = 303...T = 423$ К. Водночас, варто зазначити, що експериментально отримані результати дослідження композитів, наповнених за різного вмісту НДГС добре корелюють з нижче наведеними розрахунковими даними температури склування й усадки.

На наступному етапі роботи досліджували температуру склування (T_c) розроблених КМ, модифікованих НДГС. Установлено (рис. 3), що при введенні у епоксидний зв'язувач наповнювача в кількості $q = 1,00...5,00$ мас.ч. T_c КМ істотно зменшується ($T_c = 318...320$ К.). Треба зазначити, що це на 2...3 % менше, ніж у контрольних зразків ($T_c = 327$ К.). Максимальним значенням температури склування ($T_c = 328$ К) серед усіх випробуваних матеріалів характеризується КМ із вмістом НДГС $q = 15,00$ мас.ч. Як видно на рис. 3, з урахуванням похибки експерименту, максимум температури склування майже не збільшується щодо епоксидної основи ($T_c = 327$ К), що свідчить про незначний вплив добавки на цей показник.

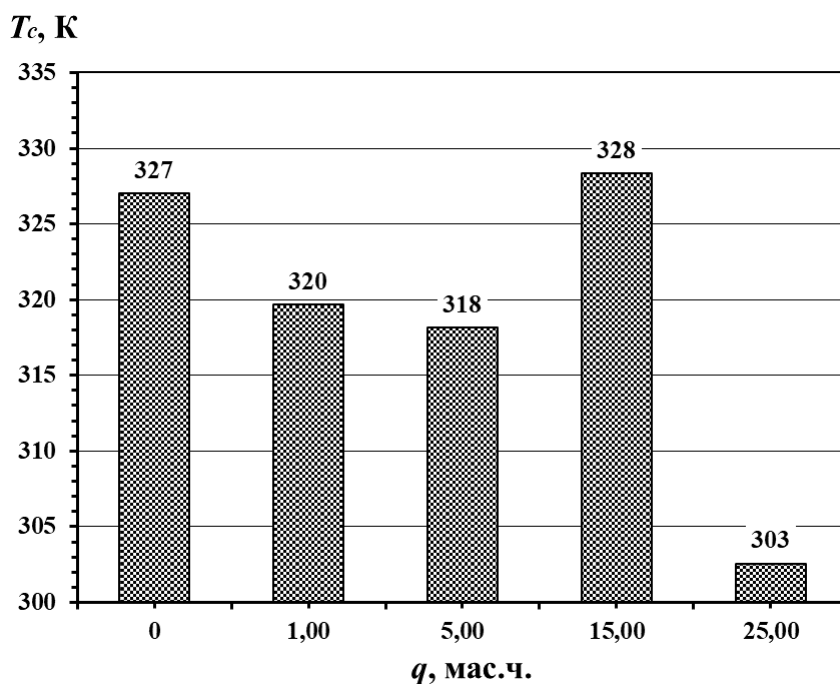


Рисунок 3 – Температура склування (T_c , К) розроблених композитів, наповнених частками НДГС

У процесі подальшого збільшення концентрації НДГС у полімерній композиції до $q = 25,00$ мас.ч. спостерігали значне зменшення величин T_c до 302,7 К, що на $\Delta T_c = 7,6$ % менше значення матриці, наведеного вище. Підсумовуючи, з аналізу отриманих результатів можна зробити висновок, що збільшення вмісту добавки, яка перевищує допустиму її концентрацію ($q = 15,00$ мас.ч.) призводить до значного зменшення T_c розроблених епоксидних нанокompозитів.

Одночасно досліджували усадку КМ залежно від уведеної кількості добавки НДГС. Аналізуючи рис. 4, можна помітити, що цей показник для КМ істотно знижується зі збільшенням вмісту вуглецевого нанонаповнювача. Доведено, що при введенні в епоксидний

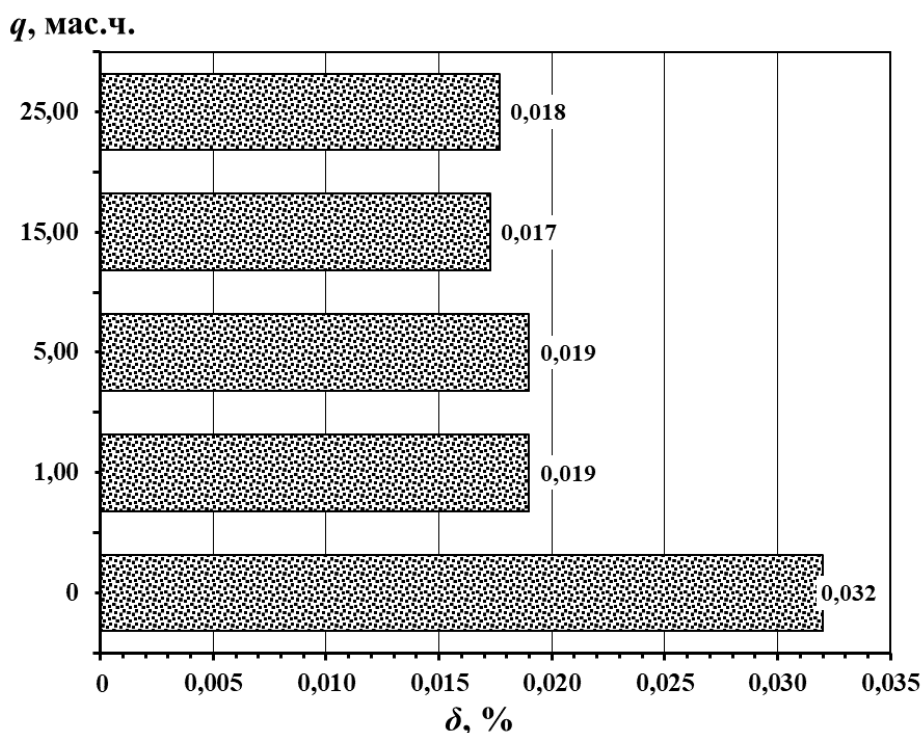


Рисунок 4 – Залежність лінійної усадки (δ , %) КМ від вмісту наповнювача НДГС

зв'язувач частинок НДГС у мінімальному концентраційному діапазоні ($q = 1,00 \dots 5,00$ мас.ч.), усадка КМ знижується від $\delta = 0,0323$ % (для вихідної матриці) до $0,019$ % відповідно. Наступне збільшення концентрації наповнювача ($q = 15,00 \dots 25,00$ мас.ч.) в епоксидних композиціях демонструє подальше, але в межах похибки експерименту, незначне зменшення δ КМ до $0,018 \dots 0,017$ %. Треба зазначити, що найменшими показниками усадки КМ характеризуються матеріали із вмістом НДГС $q = 15,00$ мас.ч. (рис. 4). Також зауважимо, що ці результати узгоджуються з описаними вище показниками температури склування, де нанокompозити з аналогічним умістом наповнювача характеризуються максимальним значенням T_c (рис. 2, $q = 15,00$ мас.ч.). Це також опосередковано свідчить про те, що введення нанодисперсних часток пігментної газової сажі за оптимального вмісту забезпечує максимальне зшивання композиції, та зумовлює підвищення як механічних, так і теплофізичних властивостей сформованих ПКМ.

На основі раніше отриманих експериментальних результатів дослідження композитних матеріалів, а саме в'язкості [14], фізико-механічних властивостей [19] та з урахуванням наведених у цій роботі їх теплофізичних характеристик, є передумови розробки інженерних методів їх нанесення на зовнішню поверхню казанка (котелка) суднового магнітного компаса, майданчика для кріплення, а також на сам тримач датчика (вібратора) ехолота, кронштейни й тримачі суднових антен (рис. 5) з метою попередження корозійного руйнування вищезазначених деталей. Це також зменшить періодичність відновлення дефектних ділянок деталей приблизно у $1,3 \dots 1,9$ рази відповідно.



Рисунок 5 – Види пошкоджень поверхонь кронштейнів, кріплень суднових антен

Висновки. На основі експериментальних досліджень теплового коефіцієнта лінійного розширення (ТКЛР) розроблених епоксидних нанокompозитів встановлено, що зі збільшенням температури цей параметр зростає. Розрахунки заздалегідь заданих температурних діапазонів ($T = (303 \dots 473) \pm 2$ К) показують, що найменшим значенням ТКЛР серед усього спектра досліджуваних композитів характеризуються ПКМ з концентрацією нанодисперсної газової сажі, яка становить $q = 5,00 \dots 15,00$ мас.ч. Це також, свідчить про те, що модифікація епоксидної матриці відповідною добавкою за умови вищезазначеного діапазону концентрацій ($q = 5,00 \dots 25,00$ мас.ч.) суттєво впливає на формування сітчастої будови полімеру, де завдяки рівномірно розподіленим у його об'ємі вуглецевим наночасткам значно ущільнюється та зміцнюється просторова структура створених матеріалів, забезпечуючи стійкість отриманих ПКМ або захисних покриттів до лінійних деформацій у наступному діапазоні температур – $T = 303 \dots T = 423$ К.

Доведено, що при введенні у епоксидний зв'язувач наповнювача у кількості $q = 1,00 \dots 5,00$ мас.ч. температура склування розроблених КМ зменшується порівняно з матричними значеннями ($T_c = 327$ К) на $2 \dots 3$ %. Максимальним значенням T_c серед усіх випробуваних зразків, яке становить 328 К, характеризується КМ із вмістом нанодобавки

$q = 15,00$ мас.ч. Подальше збільшення вмісту відповідного модифікаційного інгредієнта призводить до значного зменшення температури склування розроблених епоксидних нанокompозитів.

Установлено, що при введенні в епоксидний зв'язувач наночастинок газової сажі в мінімальному концентраційному діапазоні ($q = 1,00 \dots 5,00$ мас.ч.), усадка КМ знижується від $\delta = 0,0323$ % (для вихідної матриці) до $0,019$ % відповідно. Наступне збільшення концентрації наповнювача ($q = 15,00 \dots 25,00$ мас.ч.) в епоксидних композиціях демонструє подальше, але в межах похибки експерименту, незначне зменшення δ КМ до $0,018 \dots 0,017$ %.

Узгодженість експериментально отриманих теплофізичних характеристик розроблених нанокompозитів опосередковано вказує на те, що введення часток пігментної газової сажі за оптимального вмісту забезпечує максимальне зшивання композиції та зумовлює підвищення як механічних, так і теплофізичних властивостей сформованих ПКМ.

Розроблено нові нанокompозити та покриття на їх основі для відновлення і підвищення експлуатаційних характеристик технічних засобів судноводіння, конструкцій та механізмів морського та річкового транспорту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

а. Парасюк В. І., Кондратьєв А. В. Основи надійності технічних систем: навчальний посібник до лабораторного практикуму. Харків : Харківський авіаційний інститут, 2010. 72 с.

б. Emi H., Yuasa M., Kumano A., Yamamoto N., Arima T. and Umino M. A. Study on life assessment of ships and offshore structures. 3rd report: corrosion control and condition evaluation for a long life service of the ship. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*. 1993. Vol. 174. P. 735–747.

в. Soares C. G., Garbatov Y., Zayed A., Wang G. Influence of environmental factors on corrosion of ship structures in marine atmosphere. *Corrosion Science* 51. 2009. P. 2014–2026. DOI:10.1016/j.corsci.2009.05.028

г. Abbas M., Shafiee M. An overview of maintenance management strategies for corroded steel structures in extreme marine environments. *Marine Structures*. 2020. Vol. 71. 102718. DOI:https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2020.102718

д. Колосов О. Є., Сівецький В. І., Сокольський О. Л., Івіцький І. І., Куриленко В. М. Матеріали та технології для одержання функціональних полімерних композиційних матеріалів. *Наукові нотатки*. 2017. № 58. С. 184–192.

е. Донцов С. В. Магнитные компасы : учебное пособие. Одесса : ОНМА, 2014. 70 с.

ж. Appleyard S. F., Linford R. S., Yarwood P. J. *Marine Electronic Navigation*. Abingdon : Routledge, 2005. 616 p.

з. Смирнов Е. Л., Яловенко А. В., Перфильев В. К., Воронов В. В., Сизов В. В. Технические средства судовождения. Конструкция и эксплуатация: учебник для вузов. Санкт-Петербург : Элмор, 2000. 656 с.

и. Красильникова О. А., Кольчурин А. И. Применение полимерных конструкционных материалов в судостроении. *European research*. 2016. Вып. 5(16). С. 22–24.

й. Баженов С. Л., Берлин А. А., Кульков А. А., Ошмян В. Г. Полимерные композиционные материалы. Долгопрудный : Издательский дом «Интеллект», 2010. 352 с.

к. Курников А. С., Орехов В. А., Ефремов С. Ю. Технология судоремонта : монография. Нижний Новгород : ВГАВТ, 2008. 237 с.

л. Sapronov O., Buketov A., Sapronova A., Sotsenko V., Brailo M., Yakushchenko S., Maruschak P., Smetankin S., Kulinich A., Kulinich V., Poberezhna L. The Influence of the Content and Nature of the Dispersive Filler at the Formation of Coatings for Protection of the

Equipment of River and Sea Transport. SAE International *Journal of Materials and Manufacturing*. 2020, Vol. 13 (1). P. 81–91. DOI: <https://doi.org/10.4271/05-13-01-0006>.

m. Buketov A. V., Brailo M. V., Yakushchenko S. V., Sapronov O. O., Smetankin S. O. The formulation of epoxy-polyester matrix with improved physical and mechanical properties for restoration of means of sea and river transport. *Journal of Marine Engineering & Technology*. 2020, Vol. 19. № 3. P. 109–114. DOI: <https://doi.org/10.1080/20464177.2018.1530171>.

n. Buketov A., Smetankin S., Maruschak P., Yurenin K., Sapronov O., Matvyeyev V., Menou A. New black-filled epoxy coatings for repairing surface of equipment of marine ships. *Transport*. 2020. Vol. 35,(6). P. 679–690. DOI: doi.org/10.3846/transport.2020.14286.

o. Rubino F., Nisticò A., Tucci F. & Carlone P. Marine Application of Fiber Reinforced Composites, A Review. *Journal of Marine Science and Engineering & Technolog*. 2020. Vol 8(1), P. 26. DOI: [10.3390/jmse8010026](https://doi.org/10.3390/jmse8010026)

p. Mouritz A. P., Gellert E., Burchill P. Review of advanced composite structures for naval ships and submarines. *Compos Struct*. 2001, Vol. 53, P. 21-41.

q. Букетов А. В., Сапронов А. А., Яцюк В. Н., Скирденко В. О. Исследование влияния модификатора 4,4-метиленбис (4,1-фенилен)бис(N,N-диэтилдитиокарбамату) на структуру и свойства эпоксидной матрицы. *Пластические массы*. 2014. № 7–8. С. 9–16.

г. Санжаровский А. Т. Физико-механические свойства полимерных и лакокрасочных покрытий. Москва : Химия, 1975. 264 с.

s. Buketov A., Smetankin S., Yakushchenko S., Yurenin K., Sotsenko V., Brailo M., Kulinich V., Sapronov O., Kulinich A., Vrublevskiy R. & Bezbakh O. Physical-mechanical properties of epoxy composites filled with carbon black nano-dispersed powder for protection of transport vehicles. *Composites: Mechanics, Computations, Applications: An International Journal*. 2021. Vol. 12 (2). P. 1–12. DOI: [10.1615/CompMechComputApplIntJ.2021037544](https://doi.org/10.1615/CompMechComputApplIntJ.2021037544).

REFERENCES

1. Parasiuk V.I., Kondratiev A. V. (2010). *Osnovy nadiinosti tekhnichnykh system: navchalnyi posibnyk do laboratornoho praktykumu*. Kharkiv: Kharkivskiy aviatsiyniy instytut.
2. Emi H., Yuasa M., Kumano A., Yamamoto N., Arima T. & Umino M. A. (1993). Study on life assessment of ships and offshore structures. 3rd report: corrosion control and condition evaluation for a long life service of the ship. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*. Vol. 174, 735–747.
3. Soares C. G., Garbatov Y., Zayed A. & Wang G. (2009). Influence of environmental factors on corrosion of ship structures in marine atmosphere. *Corrosien Scien* 51. DOI [10.1016/j.corsci.2009.05.028](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.05.028)
4. Abbas M., Shafiee M. (2020). An overview of maintenance management strategies for corroded steel structures in extreme marine environments. *Marine Structures*, Vol. 71, 102718, <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2020.102718>
5. Kolosov O. Ye., Sivetskyi V. I., Sokolskyi O. L., Ivitskyi I. I. & Kurylenko V. M. (2017). Materialy ta tekhnolohii dlia oderzhannia funktsionalnykh polimernykh kompozytsiinykh materialiv. *Naukovi notatky*, 58. 184–192.
6. Doncov S. V. (2014). *Magnitnihe kompasih : uchebnoe posobie*. Odessa : ONMA.
7. Appleyard S. F., Linford R. S., Yarwood P. J. (2005). *Marine Electronic Navigation*. Abingdon : Routledge.
8. Smirnov E. L., Yalovenko A. V., Perfiljev V. K., Voronov V. V. & Sizov V. V. (2020). *Tekhnicheskie sredstva sudovozhdeniya. Konstrukciya i ehkspluatatsiya: uchebnyk dlya vuzov*. Sankt-Peterburg : Ehlmor.
9. Kurnikov A. S., Orekhvo V. A., Efremov S. Yu. (2008). *Tekhnologiya sudoremonta : monografiya*. Nizhniy Novgorod : VGAVT.
10. Bazhenov S. L., Berlin A. A., Kuljkov A. A. & Oshmyan V. G. (2010). *Polimernihe kompozicionnihe materialih*. Dolgoprudniy : Izdateljskiy dom Intellekt.

11. Kurnikov A. S., Orekhvo V. A., Efremov S. Yu. (2008). *Tekhnologiya sudoremonta : monografiya*. Nizhnij Novgorod : VGAVT.
12. Saprionov O., Buketov A., Saprionova A., Sotsenko V., Brailo M., Yakushchenko S., Maruschak P., Smetankin S., Kulinich A., Kulinich V. & Poberezhna L. (2020). The Influence of the Content and Nature of the Dispersive Filler at the Formation of Coatings for Protection of the Equipment of River and Sea Transport. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing, Vol. 13(1)*, 81–91. DOI: <https://doi.org/10.4271/05-13-01-0006>.
13. Buketov A. V., Brailo M. V., Yakushchenko S. V., Saprionov O. O. & Smetankin S. O. (2020). The formulation of epoxy-polyester matrix with improved physical and mechanical properties for restoration of means of sea and river transport. *Journal of Marine Engineering & Technology., Vol. 19. 3*, 109–114. DOI: <https://doi.org/10.1080/20464177.2018.1530171>.
14. Buketov A., Smetankin S., Maruschak P., Yurenin K., Saprionov O., Matvyeyev V. & Menou A. (2020). New black-filled epoxy coatings for repairing surface of equipment of marine ships. *Transport, Vol. 35 (6)*, 679–690. DOI: doi.org/10.3846/transport.2020.14286.
15. Rubino F., Nisticò A., Tucci F. & Carlone P. (2020). Marine Application of Fiber Reinforced Composites, A Review. *Journal of Marine Science and Engineering & Technolog. Vol. 8 (1)*, 26. DOI:10.3390/jmse8010026.
16. Mouritz A. P., Gellert E., Burchill P. (2001). Review of advanced composite structures for naval ships and submarines. *Compos Struct, Vol. 53*, 21–41.
17. Buketov A. V., Saprionov A. A., Yacyuk V. N. & Skirdenko V. O. (2014). Issledovanie vliyaniya modifikatora 4,4'-metilenbis (4,1-fenilen)bis (N,N-dietilditiokarbamatu) na strukturu i svoystva ehпоксидной матрици. *Plasticheskie massih, 7–8*, 9–16.
18. Sanzharovskiy A. T. (1975). *Fiziko-mekhanicheskie svoystva polimernikh i lakokrasochnikh pokritiy*. Moskva : Khimiya.
19. Buketov A., Smetankin S., Yakushchenko S., Yurenin K., Sotsenko V., Brailo M., Kulinich V., Saprionov O., Kulinich A., Vrublevskiy R. & Bezbakh O. (2021). Physical-mechanical properties of epoxy composites filled with carbon black nano-dispersed powder for protection of transport vehicles. *Composites: Mechanics, Computations, Applications: An International Journal, Vol. 12 (2)*, 1–12. DOI 10.1615/CompMechComputApplIntJ.2021037544.

Безбах О. М. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИННОВАЦИОННЫХ ПОЛИМЕРКОМПОЗИТНЫХ ПОКРЫТИЙ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ СУДОВОЖДЕНИЯ

Показано, что среди многочисленных полимерных материалов наибольшее практическое применение в области судостроения находят реактопласты на основе эпоксидных связующих, такой выбор обусловлен целым комплексом эксплуатационных и функциональных характеристик последних. Одним из основных и современных средств регулирования структуры и свойств эпоксидных композитных материалов является их физическая модификация нанонаполнителей различной природы. На основе экспериментальных исследований изучено влияние физико-химической модифицирующей добавки в виде пигментной газовой сажи, размер частиц которой составляет 24 ± 2 нм, на теплофизические свойства эпоксидного дианового олигомера марки ЭД - 20. В результате анализа полученных данных установлено, что введение пигментной газовой сажи в количестве $q = 1,00$ мас.ч. приводит к значительному снижению усадки КМ от $\delta = 0,032\%$ (для исходной матрицы) к $0,019\%$ соответственно. Доказано, что с дальнейшим увеличением концентрации добавки в эпоксидную матрицу ($q = 25,00$ мас.ч.) соответствующие показатели δ КМ уменьшаются не существенно. Это косвенно свидетельствует о том, что введение нанодисперсных частиц газовой сажи при оптимальном содержании обеспечивает максимальное сшивания композиции и приводит к повышению как механических, так и теплофизических свойств сформированных композитов. Разработаны новые НКМ и покрытия на их основе для восстановления и повышения эксплуатационных характеристик технических средств судовождения, конструкций и механизмов морского и речного транспорта.

Ключевые слова: эпоксидный композит, физическая модификация, нанонаполнитель, теплофизические свойства, концентрация, усадка, надежность, эксплуатация, морские транспортные средства.

Bezbakh O. M. THE USE OF INNOVATIVE POLYMER COMPOSITE COATINGS TO IMPROVE THE PERFORMANCE OF TECHNICAL MEANS OF NAVIGATION

It has been testified that among numerous polymer materials, the most practical applications in the field of shipbuilding are reactoplasts based on epoxy binders, due to a range of operational and functional characteristics of the latter. One of the main and most modern means of regulating the structure and properties of epoxy composite materials is their physical modification by nanofillers of different nature. Based on experimental studies, the effect of physicochemical modifying additive in the form of pigment gas soot, the particle size of which is 24 ± 2 nm, on the thermophysical properties of epoxy diene oligomer brand ED-20 has been studied. As a result of the analysis of the obtained data, it has been discovered that the introduction of pigment gas soot in the amount of $q = 1.00$ wt.h. leads to a significant reduction in KM shrinkage from $\delta = 0.032\%$ (for the original matrix) to 0.019% , respectively. It has been proved that with a further increase in the concentration of the additive in the epoxy matrix ($q = 25.00$ parts by weight), the corresponding values of δ KM do not decrease significantly. This indirectly indicates that the introduction of nanodispersed particles of carbon black at the optimal content provides maximum crosslinking of the composition, and leads to an increase in both mechanical and thermophysical properties of the formed composites. New NCMs and coatings based on them have been developed to restore and improve the performance of technical means of navigation, structures and mechanisms of sea and river transport.

Keywords: epoxy composite, physical modification, nanofiller, thermophysical properties, concentration, shrinkage, reliability, operation, marine vehicles.

© Безбах О. М.

Статтю прийнято
до редакції 26.04.21

ВПЛИВ МАЛЕЇНОВОГО АНГІДРИДУ НА АДГЕЗІЙНІ ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕПОКСИДНОЇ МАТРИЦІ ДЛЯ ЗАХИСТУ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

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

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

Букетов А. В., д.т.н., завідувач кафедри транспортних технологій та механічної інженерії Херсонської державної морської академії, e-mail: buketov@tntu.edu.ua, ORCID: 0000-0001-9836-3296;

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

Яцюк В. М., к.х.н., заступник завідувача відділу дослідження матеріалів, речовин і виробів Тернопільського науково-дослідного експертно-криміналістичного центру МВС України, e-mail: yatsuk-@ukr.net, ORCID: 0000-0002-0103-1250

Показано перспективність використання епоксидних матеріалів, які характеризуються поліпшеними експлуатаційними характеристиками. Однак поліпшення зазначених вище властивостей у комплексі забезпечують введенням хімічно активних до епоксидного олігомера модифікаторів, пластифікаторів, наповнювачів. Це забезпечує покращення міжфазової взаємодії, що також поліпшує властивості полімерних композитів.

У вигляді основи для матриці вибрано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20. Для полімеризації епоксидних композицій використано твердник поліетиленполіамін. У вигляді модифікатора для поліпшення властивостей епоксидних композитів використано малеїновий ангідрид. Молекулярна формула модифікатора: $C_4H_2O_3$. Молярна маса – 98,057 г/моль. Зовнішній вигляд – біла речовина. Густина – $\rho = 1,314$ г/см³ (за температури 60 °С) і $\rho = 1,480$ г/см³ (за температури 20 °С).

Установлено оптимальний уміст модифікатора малеїнового ангідриду для формування модифікованої епоксидної матриці з покращеними адгезійними і механічними властивостями. Доведено, що при формуванні композитів з поліпшеними адгезійними і фізико-механічними властивостями необхідно формувати композицію наступного складу: епоксидний олігомер марки ЕД-20 ($q = 100$ мас.ч.), твердник поліетиленполіамін ПЕПА ($q = 10$ мас.ч.), модифікатор малеїновий ангідрид ($q = 0,25$ мас.ч.).

Формування такого матеріалу забезпечує порівняно з вихідною епоксидною матрицею підвищення наступних показників властивостей композитів: адгезійної міцності при відриві у 1,3 рази (від $\sigma_a = 24,8$ МПа до $\sigma_a = 31,1$ МПа); руйнівних напружень при згинанні у 2,4 рази (від $\sigma_{32} = 48,0$ МПа до $\sigma_{32} = 117,3$ МПа); ударної в'язкості у 1,9 рази (від $W = 7,4$ кДж/м² до $W = 13,7$ кДж/м²).

Зазначимо, що модуль пружності і залишкові напруження такого матеріалу зменшуються порівняно з вихідною епоксидною матрицею у 1,2 рази (від $E = 2,8$ ГПа до $E = 2,4$ ГПа та від $\sigma_3 = 1,4$ МПа до $\sigma_3 = 1,2$ МПа відповідно). Отриманий композит доцільно використовувати у вигляді матриці при формуванні одно- чи багатошарових захисних покриттів різного функціонального призначення.

Ключові слова: матриця, епоксидний композит, модифікатор, адгезійні властивості, когезійна міцність, залишкові напруження.

DOI: 10.33815/2313-4763.2021.1.24.082–092

Постановка проблеми. Науково-технічний прогрес вимагає створення нових матеріалів, які необхідно застосовувати для збільшення ресурсу деталей транспортних засобів. Водночас новітні матеріали повинні характеризуватися у комплексі поліпшеними адгезійними та фізико-механічними властивостями. Це забезпечить не лише нівелювання передчасного старіння матеріалів, що позначиться на їхніх властивостях, але й передбачає збільшення їх надійності [1–5].

Підсумовуючи з наведеного вище необхідно зазначити перспективність використання епоксидних матеріалів, які характеризуються поліпшеними експлуатаційними властивостями. Однак поліпшення зазначених вище властивостей у комплексі забезпечують введенням хімічно активних до епоксидного олігомера

модифікаторів, пластифікаторів, наповнювачів. Це забезпечує покращення міжфазової взаємодії, що, також поліпшує властивості полімерних композитів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Авторами [6–9] доведено, що для покращення адгезійних і механічних властивостей полімерних композитів у епоксидний зв'язувач доцільно вводити модифікатори, які є активними до міжфазової взаємодії при зшиванні гетерогенних систем. Однак, на нашу думку, доцільним було б для активації процесів фізичної та хімічної полімеризації у епоксидний зв'язувач вводити як модифікатор малеїновий ангідрид. Останній характеризується карбонільними та карбоксильними групами, що, на нашу думку, дозволить збільшити ступінь гелеутворення і, як наслідок, підвищити показники необхідних властивостей матеріалів.

Мета роботи – дослідити вплив модифікатора малеїнового ангідриду на адгезійні і фізико-механічні властивості епоксидних композитних матеріалів і захисних покриттів на їх основі для транспортної галузі.

Матеріали та методика дослідження. При формуванні полімерного зв'язувача у вигляді основи використано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84). При полімеризації розроблених матеріалів на основі епоксидної смоли застосовували твердник холодного тверднення поліетиленполіамін ПЕПА (ТУ 6-05-241-202-78).

У вигляді модифікатора для поліпшення властивостей епоксидних КМ використано малеїновий ангідрид (МА). Модифікатор вводили у зв'язувач за вмісту від 0,10 до 2,00 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомера ЕД-20.

Молекулярна формула модифікатора: $C_4H_2O_3$. Молярна маса МА – 98,057 г/моль. Зовнішній вигляд – біла речовина. Густина – $\rho = 1,314$ г/см.³

Загальний вигляд хімічних зв'язків модифікатора малеїнового ангідриду наведено на рис. 1 [10].

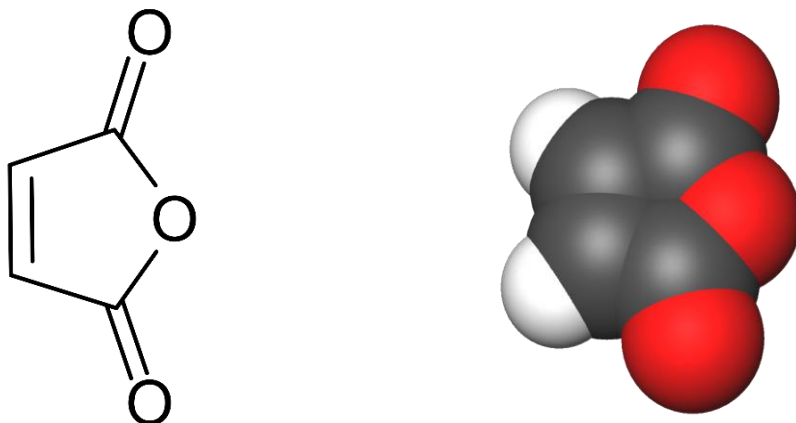


Рисунок 1 – Загальний вигляд хімічних зв'язків модифікатора малеїнового ангідриду [10]

У роботі досліджено адгезійну міцність матеріалів згідно з ГОСТом 14760 – 69, залишкові напруження – стосовно методики [5], руйнівні напруження і модуль пружності при згинанні – згідно з ГОСТом 4648-71 і 9550-81 відповідно, ударну в'язкість – відповідно до ГОСТу 4647-80.

Результати досліджень та їх обговорення. Попередньо нами було проведено дослідження щодо аналізу структури та хімічних характеристик синтезованого нами модифікатора. Для цього використано метод газової хроматографії. Водночас мас-селективним детектуванням аналізували молярну масу синтезованого малеїнового ангідриду.

Згідно з цим методом використовували модифікатор у кількості 0,0124 г, який розчиняли в метанолі. Надалі застосовували хроматографування за такої технології [11]: постійний потік газу-носія – 1,5 мл/хв; інжектор – автоінжектор 7683, Split 20:1; температура випаровувача – $T = 250$ °С; технологічні режими нагрівання: $T_{\text{поч}} = 100$ °С, утримання – 2 хв, швидкість нагрівання – 15 С/хв, $T_{\text{кін}} = 280$ °С; проба – 1,0 мкл.

Експериментальні результати випробувнь наведено на рис. 2. Спочатку проводили хроматографування проб малеїнового ангідриду, знаходячи розташування сигналів на шкалі часу утримання. Надалі аналізували параметри сигналів. Водночас експериментально отримали сигнал за час $t = 2,277$ хв (рис. 2, 3). У результаті знаходили значення характеристичних сигналів. Експериментально встановлено 10 найбільших піків при $m/z = 25,6; 26,4; 28,3; 41,3; 44,6; 52,3; 53,1; 54,9; 55,3; 98,1$.

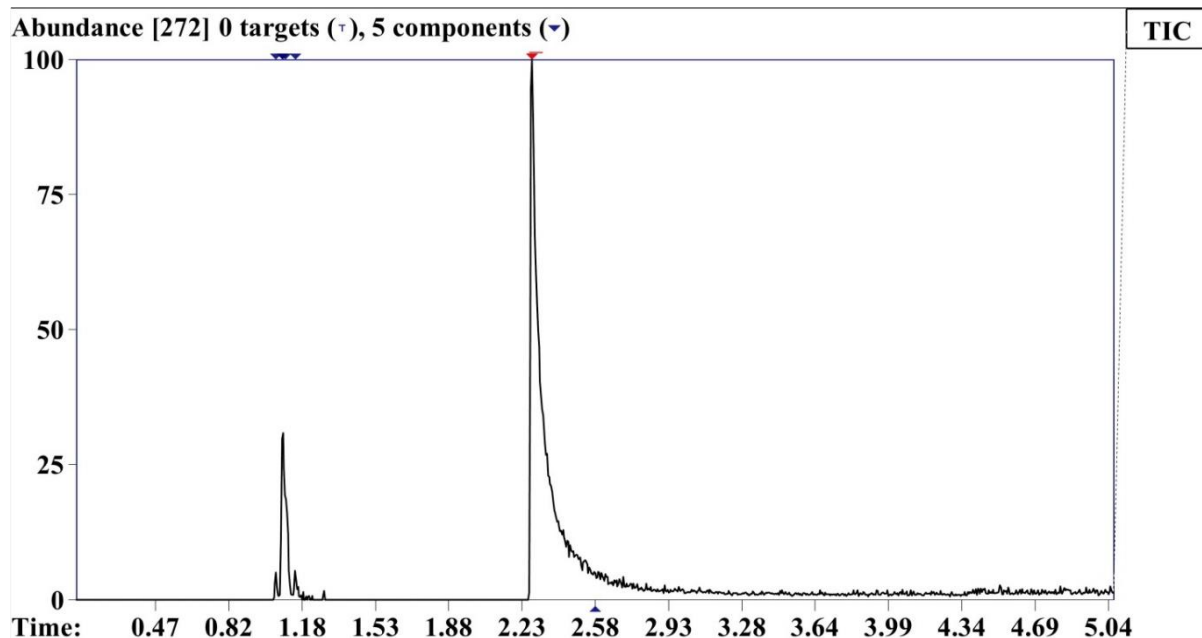


Рисунок 2, а – Значення сигналу від часу утримання проби модифікатора

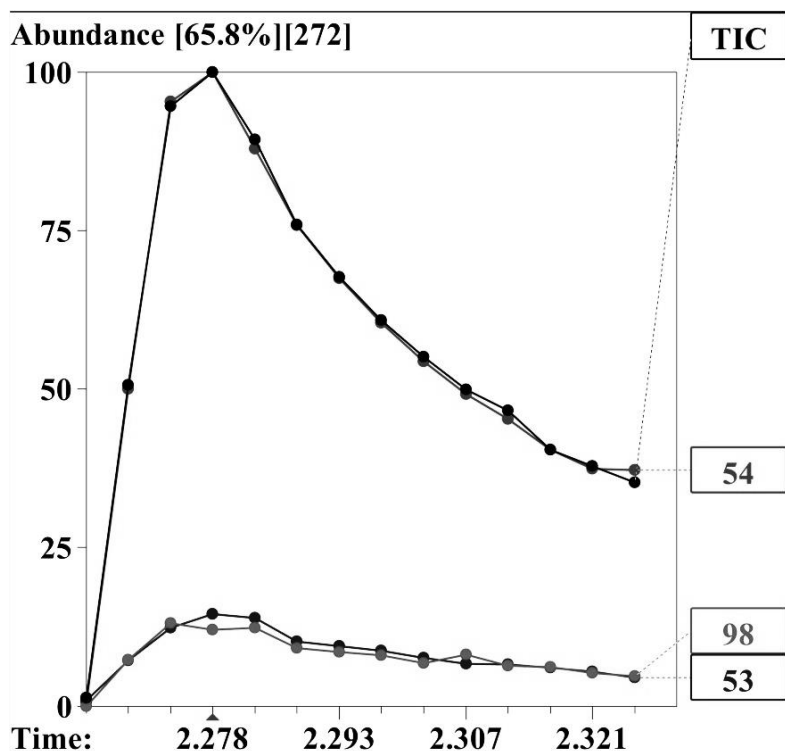
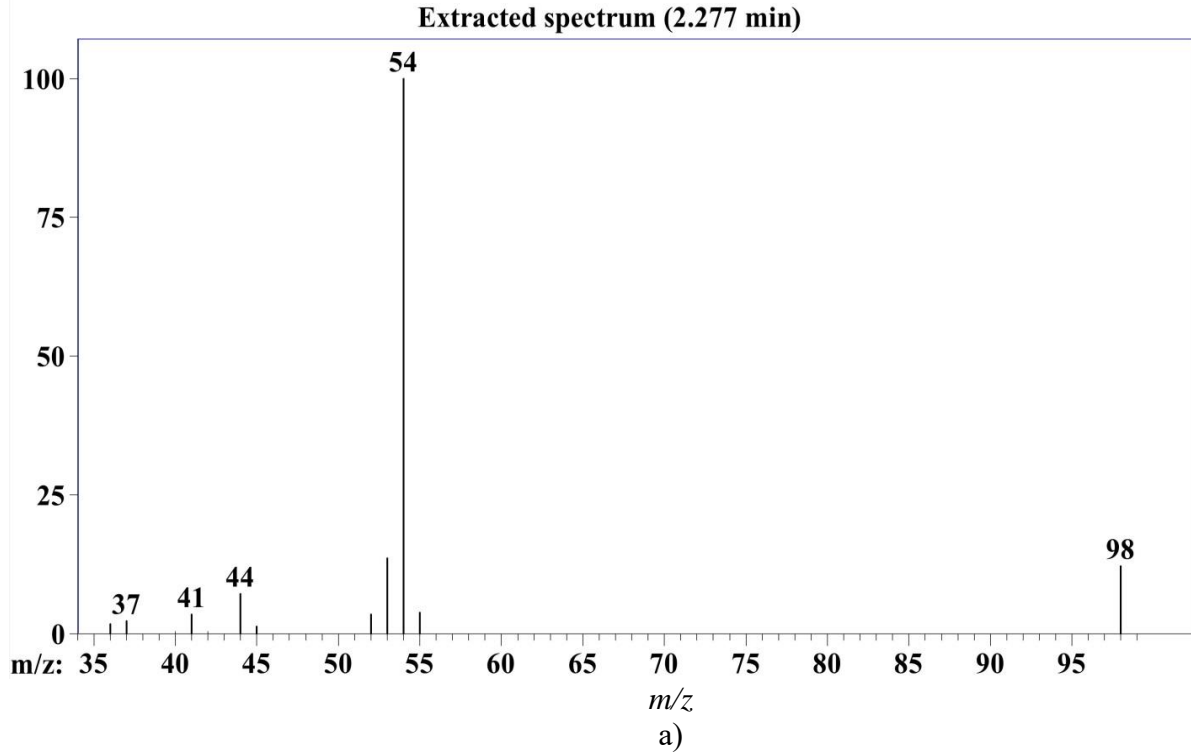


Рисунок 2, б – Значення сигналу від часу утримання проби модифікатора (у часовому проміжку $t = 2,20 \dots 2,34$ с)

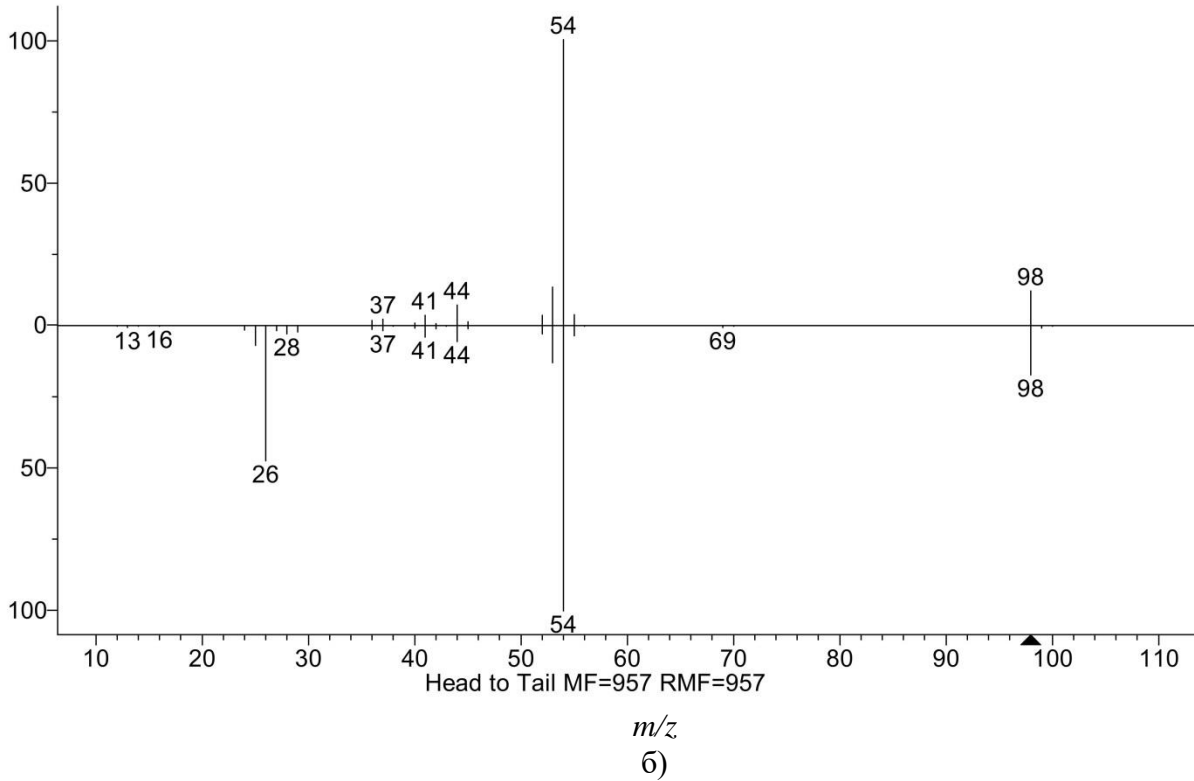
Отримані експериментальні результати порівнювали із бібліотечними табличними даними. У результаті отримали формулу хімічної структури і величину молекулярної маси синтезованого модифікатора. Підтверджено, що формула модифікатора має наступний вигляд: $C_4H_2O_3$. Молярна маса малеїнового ангідриду – 98,057 г/моль.

Зазначимо, що дані дослідження є суттєвими для оцінювання сумісності модифікатора із компонентами епоксидної матриці. Показано, що модифікатор містить, окрім бензольного кільця, активні гідроксильні та оксидні центри. Це, на нашу думку, дозволить активувати процеси хімічної взаємодії молекул добавки й активними групами епоксидного олігомера, що дозволить поліпшити адгезійні та когезійні властивості полімерного компаунду.

Значення характ. сигн., mAU



Значення характ. сигн., mAU



Значення характ. сигн., mAU

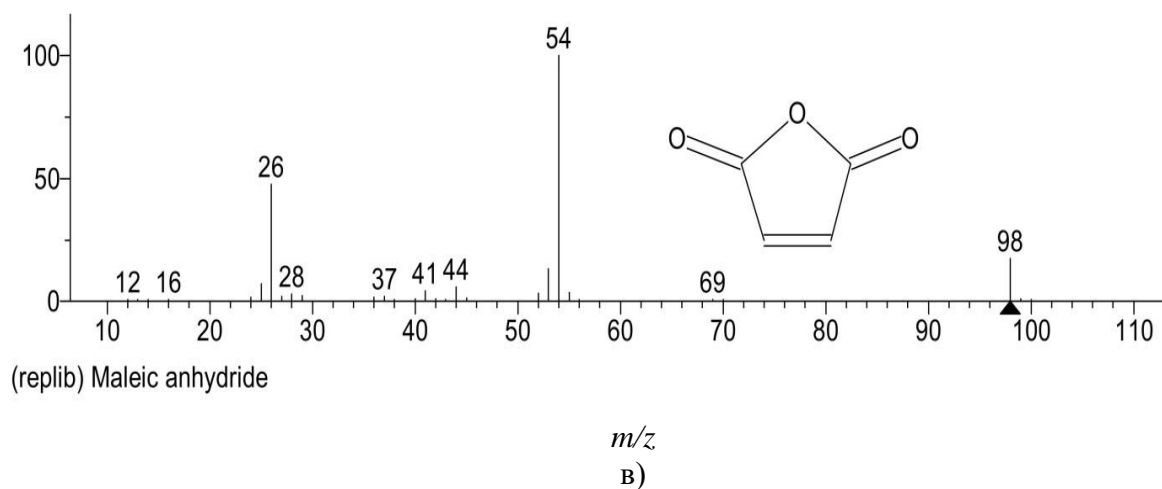


Рисунок 3 – Залежність значення характеристичних сигналів від m/z при часі утримання сигналу $RT = 2.277$ mAU; m – маса проби; z – заряд:

а) значення характеристичних сигналів; б) значення характеристичних сигналів у розгорнутих координатах; в) структура молекули модифікатора згідно зі значенням характеристичних сигналів і бібліотечних даних

Після аналізу структури і хімічних властивостей синтезованого нами модифікатора досліджували вплив вмісту малеїнового ангідриду на адгезійні і фізико-механічні властивості епоксидної матриці. Попередньо експериментально встановлено (рис. 4), що адгезійна міцність немодифікованої епоксидної матриці становить $\sigma_a = 24,8$ МПа. Доведено, що формування компаунду у вигляді епоксидного олігомера і модифікатора призводить до створення КМ з поліпшеними адгезійними властивостями. Зокрема, встановлено (рис. 4), що оптимальним з усього спектра досліджуваних матеріалів є введення у епоксидний олігомер (на 100 мас.ч.) модифікатора МА за вмісту $q = 0,25$ мас.ч. Такий композит характеризується наступними показниками адгезійної міцності – $\sigma_a = 31,1$ МПа, що у 1,3 рази перевищує аналогічні показники, характерні для вихідної епоксидної матриці. Надалі збільшення вмісту добавки призводить до монотонного погіршення адгезійних властивостей матриці. Зокрема, за вмісту модифікатора у кількості $q = 0,50$ мас.ч. формується матеріал із значеннями адгезійної міцності при відриві – $\sigma_a = 28,4$ МПа, а найменші показники міцності адгезійних з'єднань ($\sigma_a = 25,0$ МПа) спостерігали для КМ, який містить модифікатор у кількості $q = 2,00$ мас.ч. Такі значення адгезійної міцності аналогічні з показниками, характерними для вихідної матриці, тому подальше введення МА за підвищеного вмісту не є доцільним.

Покращення адгезійних властивостей модифікованих КМ можна пояснити наступним. Уведення модифікатора за оптимального вмісту ($q = 0,25$ мас.ч.) забезпечує інтенсивну взаємодію добавки як з макромолекулами епоксидного олігомера, так і з активними центрами на поверхні металевої основи (у нашому випадку – сталь марки Ст 3). Це також збільшує ступінь зшивання матриці на межі поділу фаз «металева основа – адгезив», з одного боку, та безпосередньо у самому матеріалі матриці, з іншого боку. У цьому випадку суттєво збільшуються показники адгезійної міцності матеріалу.

Навпаки, збільшення вмісту модифікатора (понад $q = 0,30$ мас.ч.) зумовлює погіршення адгезійних властивостей КМ. На нашу думку, це насамперед зумовлено надлишком добавки у матриці. Це передбачає збільшення золь-фракції у матеріалі що, безперечно, призводить до погіршення взаємодії на межі поділу фаз.

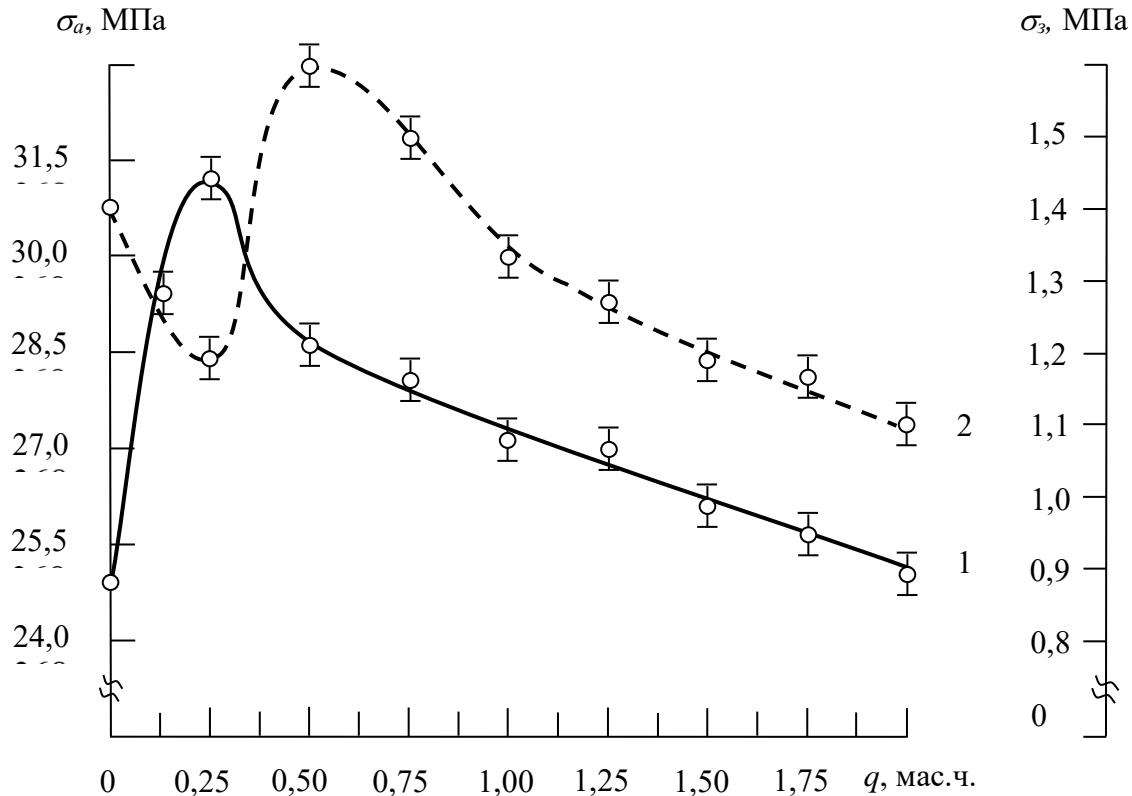


Рисунок 4 – Залежність адгезійної міцності і залишкових напружень у КМ від вмісту модифікатора малеїнового ангідриду: 1 – адгезійна міцність при відриві (σ_a); 2 – залишкові напруження (σ_z). Матеріал основи – сталь марки Ст 3

Підтвердженням наведеного вище є результати дослідження залишкових напружень КМ з різним вмістом модифікатора. Показано (рис. 4), що залишкові напруження у вихідній епоксидній матриці становлять $\sigma_z = 1,4$ МПа. Уведення добавки у кількості $q = 0,25$ мас.ч. сприяє зменшенню показників цієї властивості до $\sigma_z = 1,2$ МПа, що у 1,2 рази є меншим порівняно з аналогічними показниками для вихідної матриці. Цікавим є те, що введення МА за вмісту $q = 0,50$ мас.ч. призводить до збільшення залишкових напружень до $\sigma_z = 1,6$ МПа. Це перевищує показники, характерні для вихідної матриці. Надалі збільшення вмісту добавки сприяє монотонному зменшенню напружень до $\sigma_z = 1,1$ МПа (за вмісту модифікатора у кількості $q = 2,00$ мас.ч.).

Отримані результати добре узгоджуються з аналогічними концентраційними залежностями адгезійної міцності при відриві, адже найменшими залишковими напруженнями ($\sigma_z = 1,2$ МПа) характеризується композит з найбільшою адгезійною міцністю ($\sigma_a = 31,1$ МПа), який містить модифікатор – малеїновий ангідрид у кількості $q = 0,25$ мас.ч. Крім того, зазначимо, що максимальними залишковими напруженнями ($\sigma_z = 1,6$ МПа) з усього спектра досліджуваних матеріалів характеризується КМ із вмістом МА у кількості $q = 0,50$ мас.ч., який також відрізняється достатньо високими показниками адгезійної міцності ($\sigma_a = 28,4$ МПа). Це зумовлено надлишком модифікатора у полімерній системі, що зумовлює хоч і підвищення показників адгезійних властивостей, однак залишкові напруження водночас суттєво зростають.

Як було показано вище, окрім адгезійних властивостей, важливим при експлуатації захисних покриттів є показники їх когезійних характеристик. Тому наступним етапом випробувань було дослідження механічних властивостей модифікованої малеїновим ангідридом епоксидної матриці.

Експериментально встановлено (рис. 5), що модуль пружності для епоксидної матриці становить $E = 2,8$ ГПа. Водночас уведення модифікатора призводить до

монотонного зниження модуля пружності КМ незалежно від вмісту добавки. У такому випадку формуються матеріали, які характеризуються наступними показниками модуля пружності при згинанні 2,3...2,5 ГПа, що в середньому у 1,2 рази й меншим порівняно з аналогічними даними, характерними для вихідної матриці. Отже, можна констатувати про погіршення пружних властивостей матеріалів, що передбачає покращення їх пластичних характеристик.

Водночас треба виокремити результати дослідження руйнівних напружень при згинанні модифікованих КМ. Експериментально встановлено (рис. 5), що руйнівні напруження для вихідної епоксидної матриці становлять $\sigma_{32} = 48,0$ МПа. Однак, уведення добавки за незначного вмісту ($q = 0,25$ мас.ч.) забезпечує скачкоподібне збільшення (у 2,4 рази) показників руйнівних напружень розробленого композиту. У такому випадку руйнівні напруження зростають від $\sigma_{32} = 48,0$ МПа до $\sigma_{32} = 117,3$ МПа. Надалі збільшення вмісту добавки призводить до монотонного погіршення досліджуваної властивості матеріалів. Водночас, за вмісту МА у кількості $q = 0,50$ мас.ч. формується матеріал із руйнівними напруженнями – $\sigma_{32} = 108,5$ МПа, а за вмісту добавки $q = 2,00$ мас.ч. – $\sigma_{32} = 85,7$ МПа.

Можна стверджувати про високу міцність, а, отже, і пластичність модифікованих матеріалів, які працюють в умовах згинаючих навантажень. Такі результати пояснюють поліпшенням когезійної міцності матеріалів, з одного боку, а також зменшенням їх жорсткості, про що свідчать показники модуля пружності при згинанні, з іншого боку. Крім того, методом ІЧ-спектроскопії доведено, що покращення властивостей, модифікованої матриці, порівняно з вихідною, зумовлено наявністю у добавці С-С зв'язків, а також карбонільних (C=O) та карбоксильних (C-H) груп, які активно взаємодіють під час полімеризації з гідроксильними, епоксидними, карбонільними і карбоксильними групами епоксидного олігомера. Це дозволяє суттєво підвищити показники механічних характеристик епоксидної матриці за наявності незначного вмісту синтезованого модифікатора.

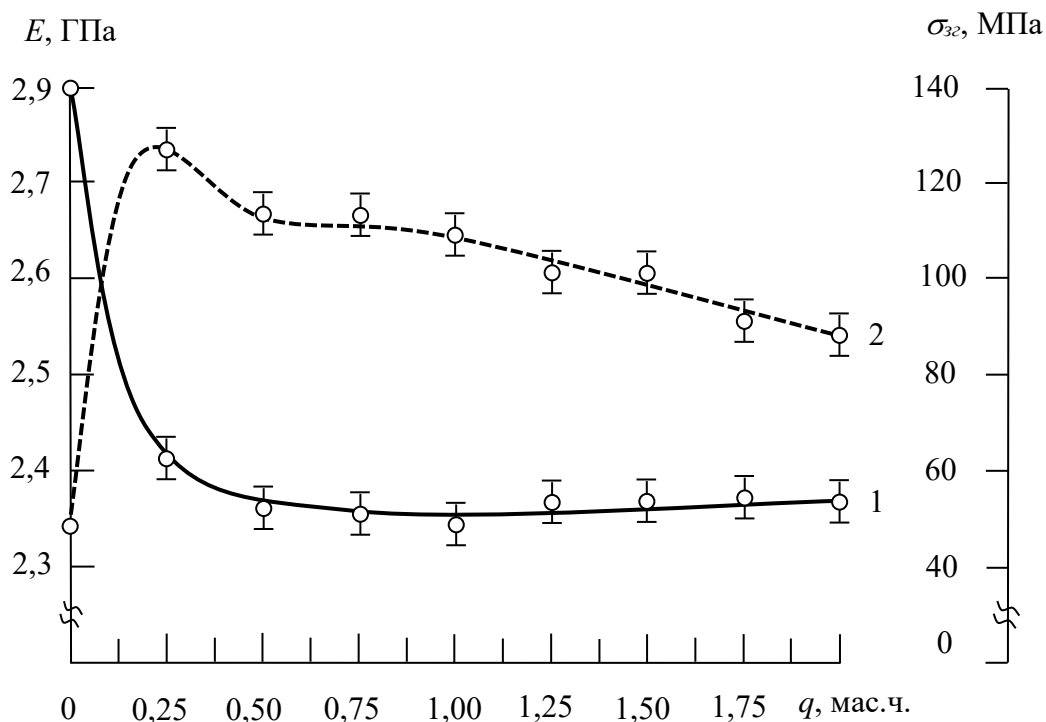


Рисунок 5 – Залежність фізико-механічних властивостей епоксидної матриці від вмісту модифікатора малеїнового ангідриду: 1) модуль пружності при згинанні (E); 2) руйнівні напруження при згинанні (σ₃₂)

Додатково нами проведено дослідження поведінки розроблених матеріалів при ударних навантаженнях. Експериментально встановлено (рис. 6), що показники ударної в'язкості вихідної епоксидної матриці становлять $W = 7,4$ кДж/м². Уведення у епоксидний зв'язувач модифікатора малеїнового ангідриду за гомеопатичного вмісту ($q = 0,25$ мас.ч.) забезпечує стосовно вихідної матриці збільшення показників ударної в'язкості у 1,9 рази (від $W = 7,4$ кДж/м² до $W = 13,7$ кДж/м²). Надалі збільшення вмісту добавки призводить до погіршення опору КМ до впливу ударних навантажень. Показано (рис. 3.5), що за вмісту МА у кількості $q = 0,50$ мас.ч. формується КМ, ударна в'язкість якого становить $W = 10,1$ кДж/м², а композит, наповнений ангідридом за вмісту $q = 2,00$ мас.ч. характеризується найменшими значеннями ударної в'язкості – $W = 7,5$ кДж/м² серед вибраного діапазону досліджуваних матеріалів.

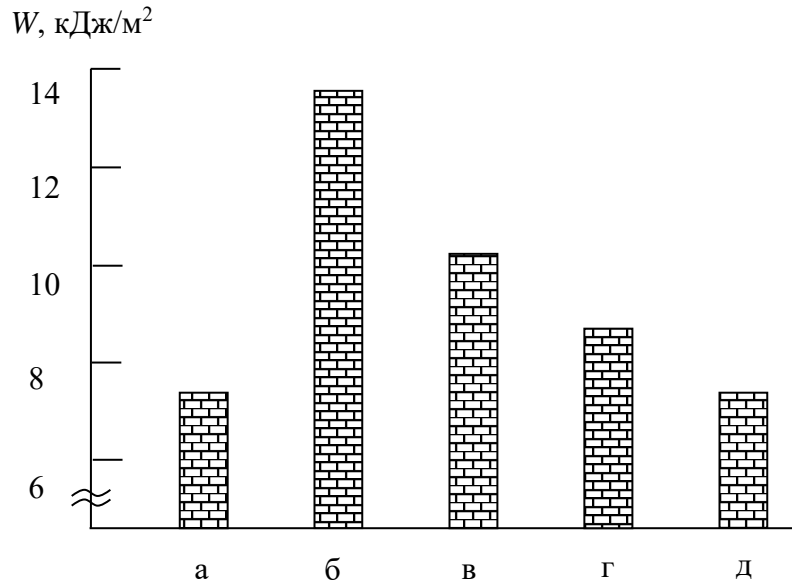


Рисунок 6 – Залежність ударної в'язкості (W) від вмісту (q) модифікатора малеїнового ангідриду у компаунді: а) вихідна матриця (контрольний зразок); б) $q = 0,25$ мас.ч.; в) $q = 0,50$ мас.ч.; г) $q = 1,00$ мас.ч.; д) $q = 2,00$ мас.ч.

Аналіз у комплексі проведених досліджень адгезійних та фізико-механічних властивостей розроблених КМ дозволяє констатувати наступне. Модифікатор малеїновий ангідрид доцільно застосовувати при формуванні полімерної матриці з поліпшеними властивостями, позаяк він містить у структурі активні до фізико-хімічної взаємодії з епоксидним олігомером С-С зв'язки, а також карбонільні (C=O) та карбоксильні (C-H) групи. При зшиванні компаунду останні взаємодіють з макромолекулами епоксидного зв'язувача, що забезпечує підвищення гель-фракції у матриці, а, отже, і поліпшення її властивостей.

Висновки. У роботі встановлено оптимальний уміст модифікатора малеїнового ангідриду для формування модифікованої епоксидної матриці з покращеними адгезійними і механічними властивостями.

Доведено, що при формуванні композитів з поліпшеними адгезійними і фізико-механічними властивостями необхідно формувати композицію наступного складу: епоксидний олігомер марки ЕД-20 ($q = 100$ мас.ч.), твердник поліетиленполіамін ПЕПА ($q = 10$ мас.ч.), модифікатор малеїновий ангідрид ($q = 0,25$ мас.ч.).

Формування такого матеріалу забезпечує порівняно з вихідною епоксидною матрицею підвищення наступних показників властивостей композитів:

- адгезійної міцності при відриві у 1,3 рази (від $\sigma_a = 24,8$ МПа до $\sigma_a = 31,1$ МПа);
- руйнівних напружень при згинанні у 2,4 рази (від $\sigma_{3z} = 48,0$ МПа до $\sigma_{3z} = 117,3$ МПа);

– ударної в'язкості у 1,9 рази (від $W = 7,4$ кДж/м² до $W = 13,7$ кДж/м²).

Зазначимо, що модуль пружності і залишкові напруження такого матеріалу зменшуються порівняно з вихідною епоксидною матрицею у 1,2 рази (від $E = 2,8$ ГПа до $E = 2,4$ ГПа та від $\sigma_3 = 1,4$ МПа до $\sigma_3 = 1,2$ МПа відповідно). Отриманий композит доцільно використовувати у вигляді матриці при формуванні одно- чи багатошарових захисних покриттів різного функціонального призначення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Саакиян Л. С., Ефремов А. П., Соболева И. А. Повышение коррозионной стойкости нефтегазопромышленного оборудования. Москва : Надра, 1988. 211 с.
2. Родюшкин В. М. Исследования технического состояния материалов и конструкций методами акустического зондирования : автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 01.02.06. Нижний Новгород, 2008. 39 с.
3. Родькина А. В. Защита корпусных конструкций судов и плавучих технических сооружений от локальных коррозионно-механических разрушений: дис. к-та техн. наук: 05.08.03. Нижний Новгород. 2019. 177 с.
4. Огнева В. В., Бурмистров Е. Г. Анализ факторов, определяющих скорость изнашивания корпусов судов внутреннего и смешанного (река-море) плавания. *Конгресс Международного форума «Великие реки»*, 2014, С. 317–321.
5. Komsta H., Vitenko T., Buketov A., Syzonenko O., Bezbakh O., Torpakov A., Kruglyj D., Appazov E., Popovych P., Rybicka I. Study of thermal stability and energy of activation of epoxy composites with particles of synthesised powder mixture for increasing reliability of vehicles. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2021. 110, 73–86. ISSN: 0209-3324. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2021.110.6>.
6. Buketov A., Yakushchenko S., Abdellah Menou, Bezbakh O., Vrublevskyi 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. URL : <https://doi.org/10.26552/com.C.2021.2.B89-B96>.
7. Brailo M. V., Buketov A. V., Yakushchenko S. V., Sapronov O. O., Dmytriiev D. O., Buketova N. M. Development of Epoxy-polyester Nanocomposite Materials with Improved Physical and Mechanical Properties for Increasing Transport Vehicle Reliability. *Journal of nano- and electronic physics*. 2021. Vol. 13, № 1, 01003-1–01003-5. DOI: [https://doi.org/10.21272/jnep.13\(1\).01003](https://doi.org/10.21272/jnep.13(1).01003)
8. Buckton A., Smetankin S., Yakushchenko S., Yurenin K., Sotsenko V., Brailo M., Kulinich V., Sapronov O., Kulinich A., Vrublevskyi R. & Bezbakh O. Physical-mechanical properties of epoxy composites filled with carbon black nano-dispersed powder for protection of transport vehicles. *Composites: Mechanics, Computations, Applications: An International Journal*. 2021. Vol. 12, no 2, 1–12. DOI:10.1615/CompMechComputApplIntJ.2021037544.
9. Buketov A. V., Sizonenko O. M., Kruglyj D. G., Cherniavska T. V., Appazov E. S., Klevtsov K. M., Lypian Ye. V. Influence of synthesized iron-carbides mixture on properties of epoxy coatings for transport. *Journal of Engineering and Applied Science*. 2020. Vol. 67, Issue 7, 1633–1648. URL : <https://www.jeasonline.org/paper/1157/preview>.
10. URL : https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B0%D0%BB%D0%B5%D1%97%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%B9_%D0%B0%D0%BD%D0%B3%D1%96%D0%B4%D1%80%D0%B8%D0%B4
11. Букетов А. В., Сметанкін С. О., Чернявська Т. В., Браїло М. В., Сапронов О. О., Соценко В. В., Юренін К. Ю., Кулініч В. Г., Якущенко С. В., Яцюк В. М. Метод підвищення ресурсу роботи устаткування річкового та морського транспорту за рахунок використання модифікованих захисних антикорозійних покриттів : монографія. Херсон : ХДМА, 2021. 126 с.

REFERENCES

1. Saakiyan L. S., Efremov A. P., Soboleva I. A. (1988). *Povihshenie korrozionnoy stoykosti neftegazopromihslavogo oborudovaniya*. Moskva : Nadra. 211.
2. Rodyushkin V. M. (2008). Issledovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya materialov i konstrukciy metodami akusticheskogo zondirovaniya. *Extended abstract of Doctor's thesis*. Nizhniy Novgorod. 39.
3. Rodjkina A. V. (2019). Zathita korpusnikh konstrukciy sudov i plavuchikh tekhnicheskikh sooruzheniy ot lokalnikh korrozionno-mekhanicheskikh razrusheniy. *Doctor's thesis*. Nizhniy Novgorod.
4. Ogneva V. V., Burmistrov E. G. (2014). Analiz faktorov, opredelyayutikh skorostj iznashivaniya korpusov sudov vnutrennego i smeshannogo (reka-more) plavaniya. *Kongress Mezhdunarodnogo foruma «Velikie reki»*, 317–321.
5. Komsta H., Vitenko T., Buketov A., Syzonenko O., Bezbakh O., Torpakov A., Kruglyj D., Appazov E., Popovych P., Rybicka I. (2021). Study of thermal stability and energy of activation of epoxy composites with particles of synthesised powder mixture for increasing reliability of vehicles. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 110, 73–86.
6. Buketov A., Yakushchenko S., Abdellah Menou, 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. Retrived from <https://doi.org/10.26552/com.C.2021.2.B89-B96>.
7. Braïlo M. V., Buketov A. V., Yakushchenko S. V., Sapronov O. O., Dmytriiev D. O., Buketova N. M. (2021). Development of Epoxy-polyester Nanocomposite Materials with Improved Physical and Mechanical Properties for Increasing Transport Vehicle Reliability. *Journal of nano- and electronic physics, Vol. 13, 1*, 01003-1–01003-5.
8. Buckton A., Smetankin S., Yakushchenko S., Yurenin K., Sotsenko V., Braïlo M., Kulinich V., Sapronov O., Kulinich A., Vrublevskiy R. & Bezbakh O. (2021). Physical-mechanical properties of epoxy composites filled with carbon black nano-dispersed powder for protection of transport vehicles. *Composites: Mechanics, Computations, Applications: An International Journal, Vol. 12, no. 2*, 1–12.
9. Buketov A. V., Sizonenko O. M., Kruglyj D. G., Cherniavska T. V., Appazov E. S., Klevtsov K. M., Lypian Ye. V. (2020). Influence of synthesized iron-carbides mixture on properties of epoxy coatings for transport. *Journal of Engineering and Applied Science, Vol. 67, Issue 7*, 1633–1648. Retrived from <https://www.jeasonline.org/paper/1157/preview>.
10. Retrived from https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B0%D0%BB%D0%B5%D1%97%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%B9_%D0%B0%D0%BD%D0%B3%D1%96%D0%B4%D1%80%D0%B8%D0%B4
11. Buketov A. V., Smetankin S. O., Chernyavska T. V., Braïlo M. V., Sapronov O. O., Socenko V. V., Yurenin K. Yu., Kulinich V. G., Yakuthenko S. V., Yacyuk V. M. (2021). *Metod pidvithennya resursu roboti ustatkuvannya richkovogo ta morsjkogo transportu za rakhunok vikoristannya modifikovanikh zakhisnikh antikorozijnikh pokrittiv* : monografiya. Kherson : KhDMA.

Житник Д. В., Гусев В. Н., Букетов А. В., Кулинич В. Г., Яцюк В. Н. ВЛИЯНИЕ МАЛЕИНОВОГО АНГИДРИДА НА АДГЕЗИОННЫЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИДНОЙ МАТРИЦЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Показана перспективность использования эпоксидных материалов, которые отличаются улучшенными эксплуатационными характеристиками. Однако улучшения указанных выше свойств в комплексе обеспечивают введением химически активных к эпоксидному олигомеру модификаторов, пластификаторов, наполнителей. Это обеспечивает улучшение межфазного взаимодействия, что, в свою очередь, улучшает свойства полимерных композитов.

В качестве основного компонента для связующего при формировании эпоксидных материалов выбран эпоксидный диановый олигомер марки ЭД-20. Для сшивания эпоксидных композиций использован отвердитель полиэтиленполиамин. В виде модификатора для улучшения свойств эпоксидных композитов использован малеиновый ангидрид. Модификатор вводили в связующее при содержании от 0,10 до 2,00 масс.ч. на 100 масс.ч. эпоксидного олигомера ЭД-20. Молекулярная формула модификатора: $C_4H_2O_3$. Молярная масса - 98,057 г / моль. Внешний вид – белое вещество. Плотность - $\rho = 1,314$ г / см (при температуре 60 °С) и $\rho = 1,480$ г / см (при 20 °С).

Установлено оптимальное содержание модификатора малеинового ангидрида для формирования модифицированной эпоксидной матрицы с улучшенными адгезионными и механическими свойствами. Доказано, что при формировании композитов с улучшенными адгезионными и физико-механическими свойствами необходимо формирование композиции следующего состава: эпоксидный олигомер марки ЭД-20 ($q = 100$ масс.ч.), отвердитель полиэтиленполиамин ПЕПА ($q = 10$ масс.ч.), модификатор малеиновый ангидрид ($q = 0,25$ масс.ч.).

Формирование такого материала обеспечивает по сравнению с исходной эпоксидной матрицей повышение следующих показателей свойств композитов: адгезионной прочности при отрыве в 1,3 раз (от 24,8 МПа до 31,1 МПа); разрушающих напряжений при изгибе в 2,4 раза (от 48,0 МПа до 117,3 МПа); ударной вязкости в 1,9 раз (от 7,4 кДж / м² до 13,7 кДж / м²).

Отметим, что модуль упругости и остаточные напряжения такого материала уменьшаются по сравнению с исходной эпоксидной матрицей в 1,2 раз (от 2,8 ГПа до 2,4 ГПа и от 1,4 МПа до 1,2 МПа соответственно). Полученный композит целесообразно использовать в виде матрицы при формировании одно- или многослойных защитных покрытий различного функционального назначения.

Ключевые слова: матрица, эпоксидный композит, модификатор, адгезионные свойства, когезионная прочность, остаточные напряжения.

Zhytnyk D. V., Husyev V. N., Buketov A. V., Kulinich V. G., Yatsyuk V. N. INFLUENCE OF MALEIC ANHYDRIDE ON ADHESIVE AND MECHANICAL PROPERTIES OF EPOXY MATRIX FOR PROTECTION OF VEHICLE PARTS

The sustainability of application of epoxy materials, distinguished by improved performance characteristics, has been shown. However, the improvement of the above properties in the complex is provided by the introduction of modifiers, plasticizers, fillers that are reactive to the epoxy oligomer. This ensures an improved interfacial interaction, which, in turn, advances the properties of polymer composites.

As the main component for the binder in the formation of epoxy materials, we have chosen an epoxy diene oligomer of the ED-20 brand. Polyethylene polyamine hardener has been used for epoxy compositions crosslinking. Maleic anhydride has been used as a modifier to improve the properties of epoxy composites. The modifier was introduced into the binder at a content of from 0.10 to 2.00 mass.% per 100 mass.% epoxy oligomer ED-20. Molecular formula of the modifier: $C_4H_2O_3$. The molar mass is 98.057 g/mol. Appearance - white matter. Density - $\rho = 1.314$ g/cm (at 60 °C) and $\rho = 1.480$ g/cm (at 20 °C).

The optimal content of maleic anhydride modifier for the formation of a modified epoxy matrix with improved adhesive and mechanical properties has been established. It has been proved that when forming composites with improved adhesive, physical and mechanical properties, it is necessary to form a composition of the following formulation: epoxy oligomer ED-20 ($q = 100$ mass. %), polyethylene polyamine PEPA hardener ($q = 10$ mass.%), modifier maleic anhydride ($q = 0.25$ mass.% by weight).

The formation of that kind of material provides, in comparison with the original epoxy matrix, an increase in the following indicators of composites properties: adhesion strength at separation by 1.3 times (from 24.8 MPa to 31.1 MPa); breaking stresses in bending 2.4 times (from 48.0 MPa to 117.3 MPa); impact strength 1.9 times (from 7.4 kJ / m² to 13.7 kJ/m²).

Note that the modulus of elasticity and residual stresses of that kind of material decrease in comparison with the original epoxy matrix by a factor of 1.2 (from 2.8 GPa to 2.4 GPa and from 1.4 MPa to 1.2 MPa, respectively). It is advisable to use the obtained composite in the form of a matrix in the formation of single or multilayer protective coatings for various functional purposes.

Keywords: matrix, epoxy composite, modifier, adhesive properties, cohesive strength, residual stresses.

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

Статтю прийнято
до редакції 07.06.21

**ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ДНА
КУЗОВА НАПІВПРИЧЕПА ВАНТАЖНОГО АВТОМОБІЛЯ**

Ляшук О. Л., д.т.н., професор кафедри автомобілів Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, e-mail: oleglashuk@ukr.net, ORCID: 0000-0003-4881-8568;

Гевко І. Б., д.т.н., професор кафедри автомобілів Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, e-mail: gevkoivan1@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5170-0857;

Левкович М. Г., к.т.н., доцент кафедри автомобілів Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, e-mail: Levkovmin@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6793-8736;

Вовк Ю. Я., к.т.н., доцент кафедри автомобілів Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, e-mail: sepd.tntu@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8983-2580;

Сташків М. Я., к.т.н., доцент кафедри технічної механіки та сільськогосподарських машин Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, e-mail: stam77@ukr.net, ORCID: 0000-0002-7325-8016;

Капський Д. В., д.т.н., професор, декан автотракторного факультету Білоруського національного технічного університету, м. Мінськ, Білорусь, e-mail: d.kapsky@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9300-3857

У статті наведено нові високоефективні конструкції вантажних автомобілів, що максимально пристосовані для перевезення певних видів вантажів і до конкретних умов експлуатації. Стаття присвячена удосконаленню технології проектування несучих конструкцій кузовів вантажних автомобілів. Виконано огляд і аналіз сучасного стану теорії математичного програмування та оптимального проектування. Запропонована чисельна процедура оптимізації несучих конструкцій кузовів вантажних автомобілів.

Проведено дослідження впливу геометричних параметрів елементів дна кузова на його напружено-деформований стан (НДС) вантажного автомобіля із загальним застосуванням методів комп'ютерного моделювання. Дослідження проводились засобами інженерного аналізу Simulation спеціалізованого програмного комплексу SolidWorks на розробленій CAD-моделі кузова напівпричепи вантажного автомобіля. Проведено аналіз зміни параметрів НДС при зміні геометричних параметрів елементів дна кузова. Досліджено характер зміни статичного напруження та переміщення залежно від зміни пропорцій поперечного перетину швелера при фіксованих геометричних розмірах заготовки й товщини заготовки та матеріалу дна кузова.

За результатами досліджень побудовано графічні залежності зміни статичного напруження, переміщення та коефіцієнта запасу міцності від ширини полки та товщини швелера; залежність статичних напружень у швелері від товщини стінки швелера та товщини листа дна кузова. Отримано рівняння, що описує характер зміни напружень у швелерах дна кузова напівпричепи. Результати проведених досліджень щодо удосконалення конструкції кузова вантажного автомобіля є основою для прийняття інженерних рішень з удосконалення конструкції дна кузова напівпричепи вантажного автомобіля, що дозволяє максимізувати вантажопідйомність та покращити міцність, зменшити вагу та продовжити експлуатаційний ресурс, а також підтримувати технічний ресурс напівпричепи за наявного ремонтної бази.

Ключові слова: дно кузова напівпричепи, швелер, розгортка, статичне напруження, статичне переміщення, CAD-модель.

DOI: 10.33815/2313-4763.2021.1.24.093–103

Вступ. Автомобільний транспорт є одним з найефективніших способів перевезення матеріалів, сировини чи готової продукції. На ринку вантажних перевезень України частка автомобільного транспорту, порівнюючи з іншими видами транспорту, постійно зростає – з 69 % у 2015 р. до близько 75 % у 2020 р.

В Україні протягом 2005–2020 рр. простежується стійка тенденція до зростання обсягів перевезення вантажів автомобільним транспортом у межах 10-13 млрд т

У середньому за добу автомобільним транспортом перевозиться 3,3 млн т вантажів, а середня відстань перевезення однієї тонни вантажів становить близько 60 км [1].

Незважаючи на постійне підвищення інтенсивності експлуатації автомобільного транспорту у сфері вантажних перевезень, оновлення парку рухомого складу автомобільного транспорту відбувається повільними темпами – майже 70 % рухомого складу є технічно та/або морально застарілими, а 50 % одиниць техніки експлуатуються більше як 10 років.

Підвищення надійності, технологічності, вантажопідйомності при одночасному зменшенні металоємності та збільшенні терміну безвідмовної експлуатації транспортних засобів забезпечує необхідну конкурентоспроможність на ринку вантажних перевезень [2].

Кузов напівпричепи вантажного автомобіля – основна частина транспортного засобу, яка містить низку каналів, виготовлених із м'якої сталі або алюмінієвого листового металу. Більшість одиниць технологічного обладнання зосереджуються на конструкції кузова вантажівки з різними модифікаціями, необхідними для мінімізації напруження та підвищення коефіцієнта навантаження. При проектуванні кузова треба враховувати експлуатаційні напруження та властивості матеріалу.

При експлуатації виникають пошкодження кузовів унаслідок зношування та екстремальних впливів, а також певних локальних ділянках рамних конструкцій виникають тріщини та інші пошкодження. У багатьох випадках при аналізі стану кузовів виявляється те, що рама напівпричепи знаходиться в задовільному стані, а кузов містить вм'ятини, тріщини чи інші дефекти [3]. Значні дослідження в цьому напрямку здійснено в наступних працях [4–15].

Ураховуючи складну економічну ситуацію на підприємствах виникає необхідність ремонту або виготовлення нових кузовів для своїх потреб.

Мета статті – дослідження впливу геометричних параметрів елементів дна кузова на його напружено-деформований стан.

Рішення задачі. При дослідженні напружено-деформованого стану металоконструкції автомобільних кузовів використовують аналітичні, чисельні та експериментальні методи.

При проектуванні кузова вантажного автомобіля важливою є мінімізація його ваги, оскільки надлишкова вага призводить до збільшення виробничих витрат, зменшення частки корисного вантажу та знижує ефективність використання палива. Згідно з концепцією зменшення ваги із забезпеченням заданої міцності, моделюється та аналізується модель кузова із змінними параметрами елементів дна. САД-моделі кузова та аналіз напружено і деформованого стану швелерів дна кузовів виконано засобами програмного комплексу SolidWorks.

У більшості кузовів вантажних автомобілів нижню частину дна виконано у вигляді швелерів (рис. 1.).

Отже, існує потреба в оптимізації конструкції кузова, що дозволяє максимізувати вантажопідйомність та покращити міцність, зменшити вагу та продовжити експлуатаційний ресурс.

Тому проведення оптимізації конструкції швелера нижньої частини кузова шляхом розгляду різних моделей є актуальним завданням.

При проектуванні дна кузова важливе значення мають розміри швелера, матеріал, їх розміщення та кількість. При виготовленні швелерів використовують листи металу розміром 2500×1250 мм та товщиною від 3 до 5 мм. Відповідно, оптимальний розкрій листа складатиме 250 мм.



Рисунок 1 – Зовнішній вигляд дна кузова

Розгортка швелера ($t=5$, $b=50$, $h=165,37$) зображена на рис. 2, а отриманий після згинання розгортки швелер – на рис 3.

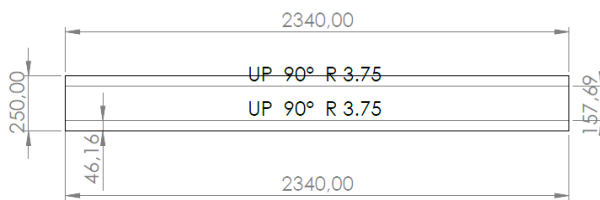


Рисунок 2 – Розгортка швелера ($t=5$, $b=50$, $h=165,37$)

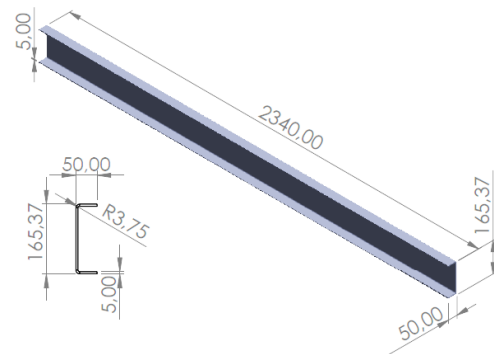


Рисунок 3 – Розміри швелера, отриманого з розгортки (рис. 2)

Нами прийнято використовувати при дослідженні швелери, які виготовлені з матеріалу товщиною від 3 до 5 мм та шириною полки 50 мм. Так як зміна товщини матеріалу призводить до зміни висоти, відповідно, отримаємо наступні розміри швелерів, які наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Розміри швелера залежно від ширини полки та товщини

Товщина швелера t , мм	Ширина полки b , мм	Висота h , мм	R , мм
3	50	160,0	3,75
4	50	163,0	3,75
5	50	165,4	3,75

Для проведення дослідження напружено-деформованого стану (НДС) було створено модель швелерів згідно з табл. 1. Побудовано сітку оболонки з використанням серединних поверхонь для моделей з глобальним розміром 30,86 мм та допуском 1,54 мм (рис. 4).

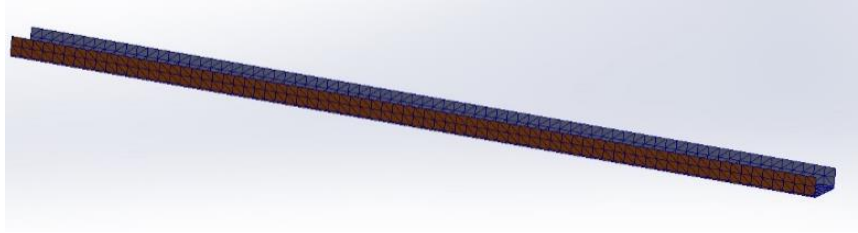


Рисунок 4 – Сітка кінцевих елементів з використанням серединних поверхонь

Умови прикладення навантаження зображено на рис. 5, прикладена сила на об'єкт складала $P=7700$ Н, матеріал – Ст 3 ГОСТ 380-88 (межа текучості $\sigma_T=206,81$ МПа, межа міцності 517,02 МПа).

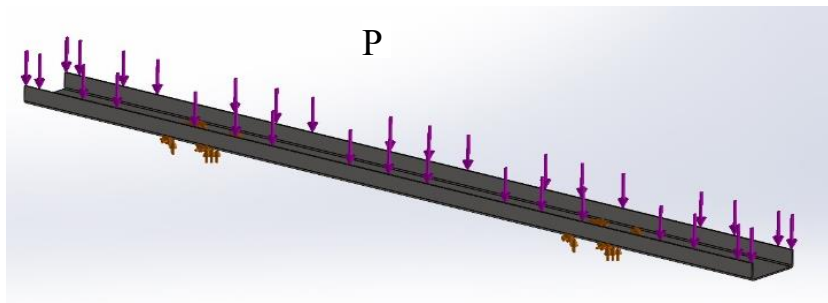
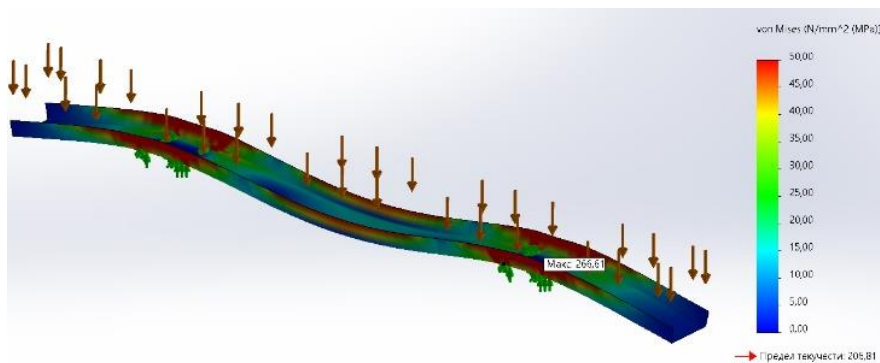


Рисунок 5 – Умови прикладення навантаження ($P=7700$ Н) та закріплення
Результати дослідження НДС швелерів наведено на рис. 6–8 та табл. 2.
Статичне напруження



Статичне переміщення

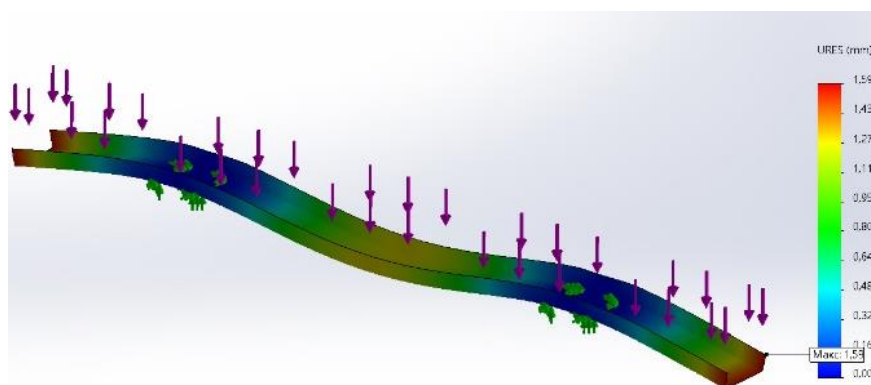
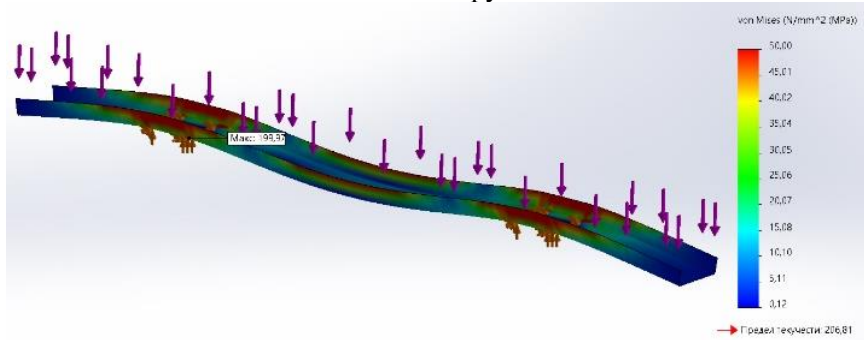


Рисунок 6 – НДС швелера при $b=50$ мм, $t=3$ мм, $\sigma_T=206,8$ МПа

Статичне напруження



Статичне переміщення

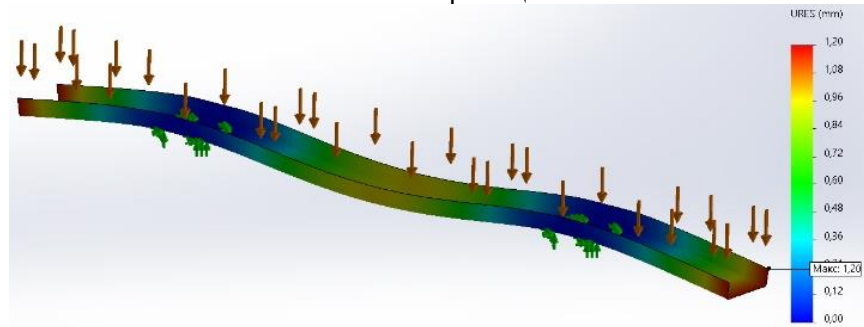
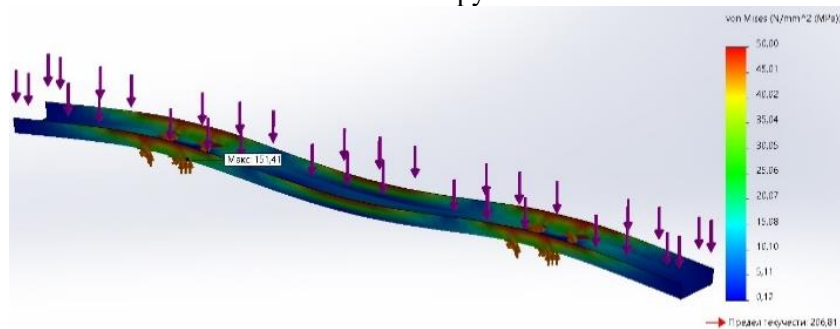


Рисунок 7 – НДС швелера при $b=50$ мм, $t=4$ мм, $\sigma_T=206,8$ МПа

Статичне напруження



Статичне переміщення

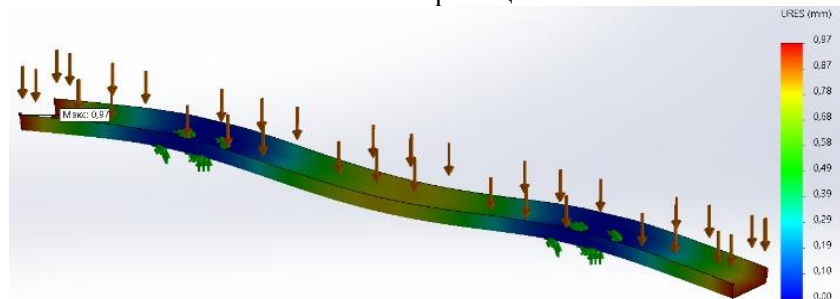


Рисунок 8 – НДС швелера при $b=50$ мм, $t=5$ мм, $\sigma_T=206,8$ МПа

Таблиця 2 – Результати дослідження статичного напруження, переміщення та коефіцієнта запасу міцності

Товщина швелера t , мм	Ширина полки швелера b , мм	Статичне напруження, МПа	Статичне переміщення, мм	Коефіцієнт запасу міцності
3	50	266,61	1,59	0,77
4	50	199,97	1,2	1,03
5	50	151,41	0,97	1,36

На основі результатів дослідження побудовано графічні залежності статичного напруження, переміщення, коефіцієнта запасу міцності від геометричних параметрів рис. 9–11.

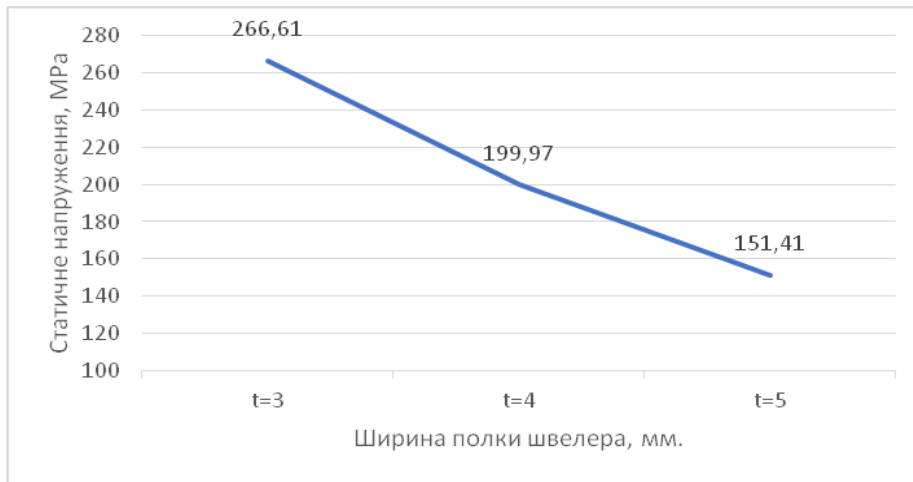


Рисунок 9 – Залежність статичного напруження (МПа) від ширини полки та товщини швелера (b=50, мм; t=3-5 мм; $\sigma_T=206,8$ МПа; прикладена сила на об'єкт 7700 Н)

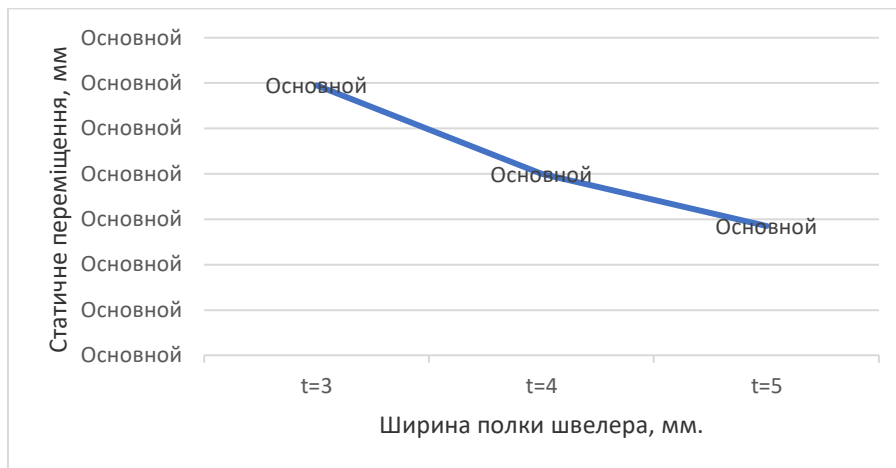


Рисунок 10 – Залежність статичного переміщення в мм від ширини полки та товщини швелера (b=50, мм; t=3-5 мм; $\sigma_T=206,8$ МПа; прикладена сила на об'єкт 7700 Н)

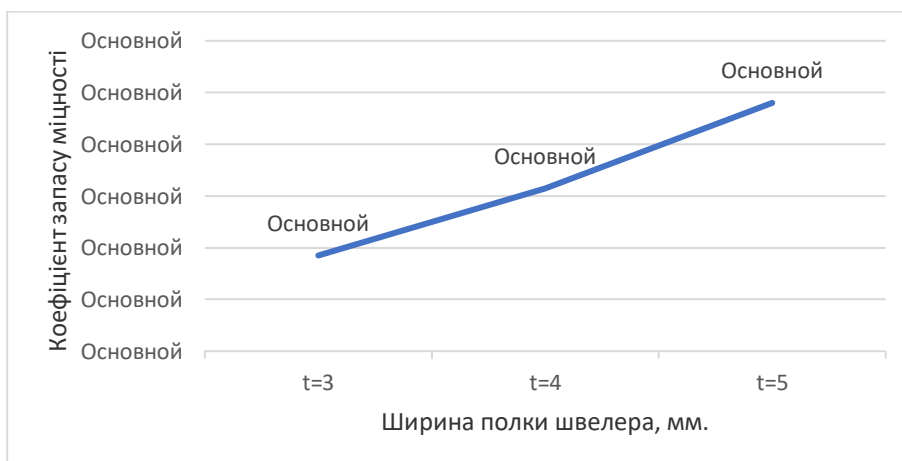


Рисунок 11 – Залежність коефіцієнта запасу міцності від ширини полки та товщини швелера (b=50, мм; t=3-5 мм; $\sigma_T=206,8$ МПа; прикладена сила на об'єкт 7700 Н)

Для проведення дослідження напружено-деформованого стану (НДС) дна кузова було створено CAD-модель кузова, рис. 12. Прикладена сила на об'єкт складала $P=200$ кН, матеріал – сталь звичайної якості Ст3пс ГОСТ 380-88.

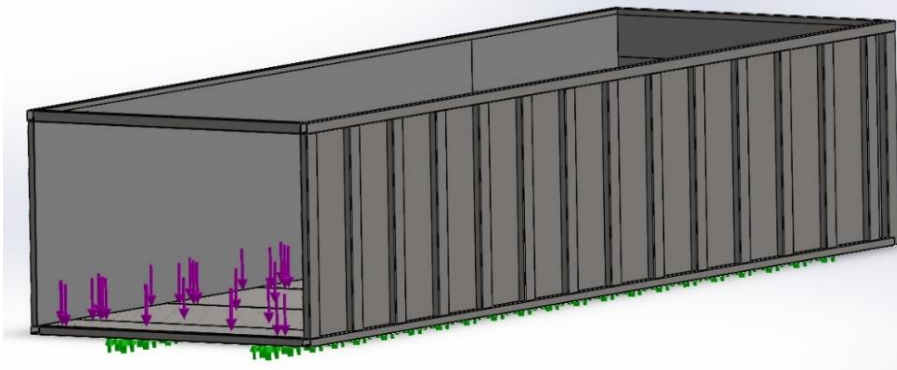


Рисунок 12 – CAD-модель кузова

При дослідженні дна кузова проводилася зміна товщини листів у діапазоні від 3 до 5 мм. На рис. 13 зображено схему розміщення швелерів.

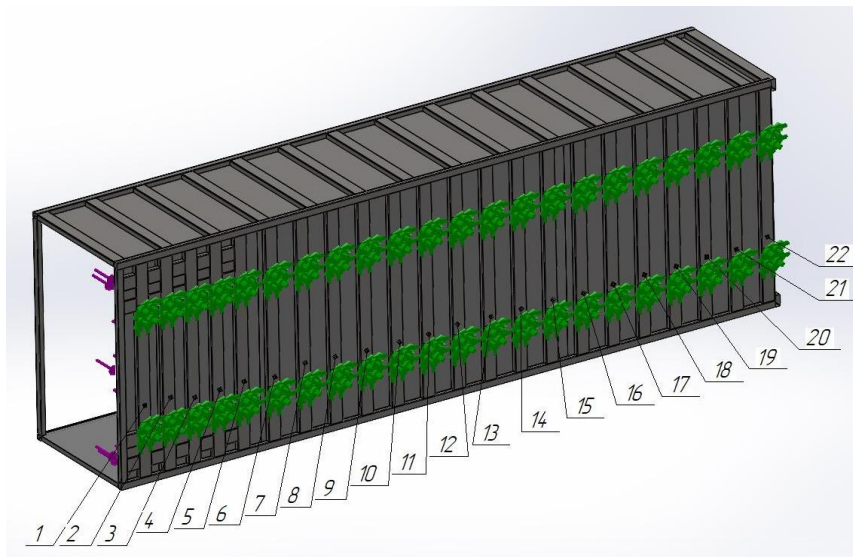


Рисунок 13 – Схема розміщення швелерів

Отримані результати подано на рис. 14–16 та у таблиці 3.

Таблиця 3 – Розрахункові статичні напруження, що діють на швелери, МПа

	Товщина листа дна, мм	Позиція швелера										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Товщина стінки швелера, $t=3$ мм	$t=3$	48,7	26,5	23,9	23,0	23,7	24,0	24,2	24,3	25,3	25,1	25,6
	$t=4$	47,3	25,3	22,9	22,2	22,8	23,5	23,8	24,2	24,6	24,7	25,1
	$t=5$	45,2	24,7	22,3	21,6	22,4	23,1	23,5	23,9	24,3	24,4	24,8
	Товщина листа дна, мм	Позиція швелера										
		12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
	$t=3$	26,1	26,3	26,8	27,5	28,1	28,5	29,4	30,7	31,1	31,3	27,7
	$t=4$	25,3	25,8	26,3	27,1	27,3	27,6	28,6	29,4	29,8	30,2	26,8
	$t=5$	24,9	25,4	25,8	26,5	26,7	27,1	27,9	28,7	28,9	29,4	25,8

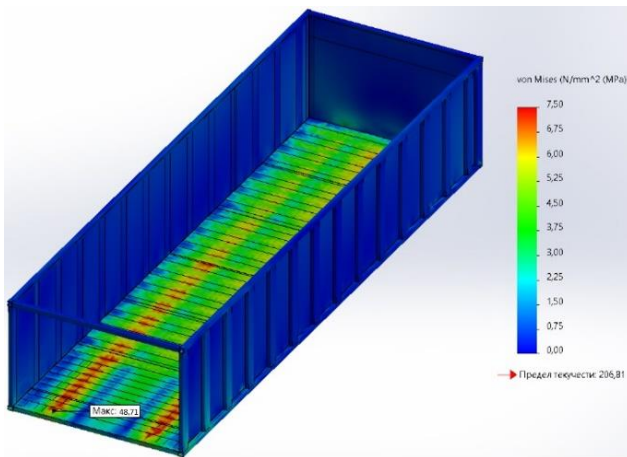


Рисунок 14 – Статичне напруження, що діє на швелер №1 ($t_{шв}=3$ мм, $t_{л,днa}=3$, $\sigma_T=206,8$ МПа)

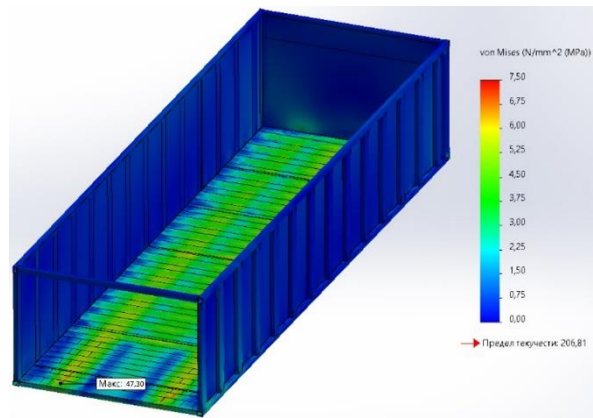


Рисунок 15 – Статичне напруження, що діє на швелер №1 ($t_{шв}=3$ мм, $t_{л,днa}=4$, $\sigma_T=206,8$ МПа)

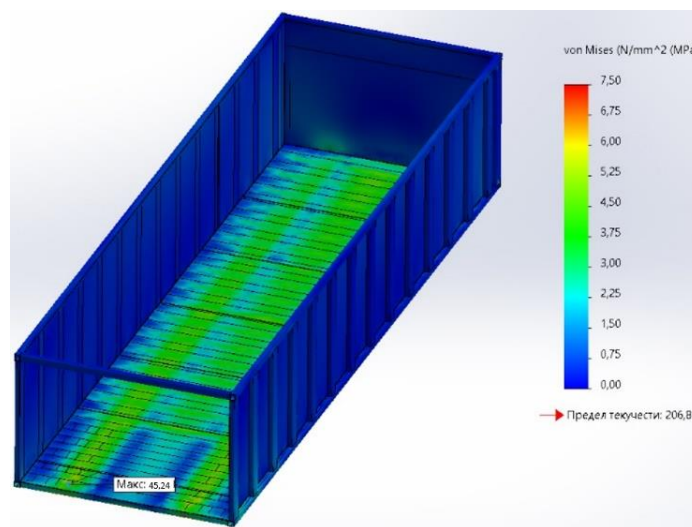


Рисунок 16 – Статичне напруження, що діє на швелер №1 ($t_{шв}=3$ мм, $t_{л,днa}=5$, $\sigma_T=206,8$ МПа)

На основі отриманих результатів побудовано залежність статичного напруження у швелерах дна кузова залежно від товщини стінки швелера та товщини листа дна кузова (рис. 17.).

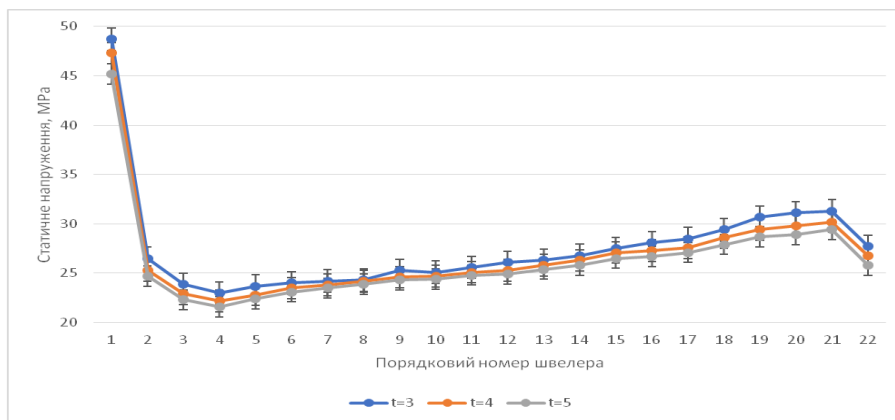


Рисунок 17 – Статичне напруження у швелерах дна кузова залежно від товщини стінки швелера та товщини листа дна кузова ($t_{шв}=3$ мм, $t_{л,днa}=3-5$, $\sigma_T=206,8$ МПа)

Характер зміни напружень у швелерах dna кузова напівпричепа в загальному можна описати рівнянням:

$$\sigma(x) = 3 \cdot 10^{-5}x^6 - 0,0027x^5 + 0,0856x^4 - 1,329x^3 + 10,591x^2 - 39,905x + 77,394.$$

Отримані результати є основою для прийняття інженерних рішень з удосконалення конструкції dna кузова напівпричепа вантажного автомобіля, що дозволяє максимізувати вантажопідйомність та покращити міцність, зменшити вагу та продовжити експлуатаційний ресурс.

Висновки. Аналіз НДС кузова напівпричепа вантажного автомобіля на основі розробленої CAD-моделі кузова дозволяє дослідити характер розподілу напружень в елементах dna кузова, встановити залежності рівня напружень та деформацій елементів dna кузова від їх товщини та товщини dna кузова, виявити найбільш небезпечні в плані несучої здатності елементи dna кузова напівпричепа. Отримані результати є основою для прийняття інженерних рішень з удосконалення конструкції dna кузова напівпричепа вантажного автомобіля.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Офіційний сайт Державної служби статистики України. URL : <http://www.ukrstat.gov.ua/> (дата звернення: 18.01.2021)
2. Krishna K. V., Reddy K. Y., Venugopal K., Ravi K. Design and analysis of truck body for increasing the payload capacity. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Bristol : IOP Publishing, 2017. Vol. 263, No. 6. 062065.
3. Vinjavarapu S., Koteswararao U., Narayana V. L. Design Optimization of Tipper Truck Body. *International Journal of Engineering Research and Development*. 2012. Vol. 4, Issue 9. P. 11–20.
4. Garud R. Y., Pandey A. Structural Analysis of Automotive Chassis, Design Modification and Optimization. *Int. Journal Appl. Eng. Res.* 2018. Vol. 13, No. 11. P. 9887–9892.
5. Nayak B., Sambaiah Ch. Design and Analysis of Dumped Body. *Int. Journal of Mech. Indus. Eng.* 2013. Vol. 2, Issue 3. P. 161–165.
6. Jithendra B., Anil K. M. Optimization of Weight and Stress Reduction of Dump For Automotive Vehicles. *Int. Journal of Engineering of Res. Technol.* 2013. Vol. 2, Issue 3. P. 1886–1893.
7. Ramacharan C., Prashanth A. S. Design and analysis of Dump Truck Floor Bed. *Int. Journal Sci. Res. Dev.*, 2015. Vol. 3, Issue 3. P. 706–710.
8. Техническая эксплуатация автомобилей / за ред. Э. С. Кузнецова. Москва : Транспорт, 1991. 412 с.
9. Павлов В. А., Муханов С. А. Транспортные прицепы и полуприцепы. Москва : Воениздат, 1981. 191 с.
10. Алямовский А. А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation. Москва : ДМК Пресс, 2010. 464 с.
11. Бочаров Н. Ф., Зузов В. Н., Курбатский М. И. Применение ЭВМ в проектировании рам грузовых автомобилей : учебное пособие. Москва : МВТУ, 1982. 36 с.
12. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. Москва : Мир, 1975. 541 с.
13. Lyashuk O., Pyndus Y., Lutsiv I., Vovk Y., Poberezhna L., Tretiakov O., Zolotyy R. Fracture cause analysis of the extruder's shaft and geometry optimization of the spline. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*. 2019. Vol. 13, No. 1. P. 4449–4460. DOI:10.15282/jmes.13.1.2019.08.0378.
14. Tson O. Analytical evaluation of technical and operational indicators impact on the transportation technology by automobile trailers. *Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics*. 2016. Vol. 1, No. 1. P. 23–26. doi:10.14254/jsdtl.2016.1-1.4.

REFERENCES

1. Ofitsiyniyi sait Derzhavnoi sluzhby statystyky Ukrainy. Rerrived from <http://www.ukrstat.gov.ua/> (data zvernennia 18.01.2021)
2. Krishna K. V., Reddy K. Y., Venugopal K., Ravi K. (2017). Design and analysis of truck body for increasing the payload capacity. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Bristol : IOP Publishing. Vol. 263, Issue 6. P. 062065.
3. Vinjavarapu S., Koteswararao U., Narayana V. L. (2012). Design Optimization of Tipper Truck Body. *International Journal of Enginerring Research and Development*, Vol. 4, Issue 9, 11–20.
4. Garud R. Y., Pandey A. (2018). Structural Analysis of Automotive Chassis, Design Modification and Optimization. *Int. J. Appl. Eng. Res*, Vol. 13, Issue 11, 9887–9892.
5. Nayak B., Sambaiah Ch. (2013). Design and Analysis of Dumped Body. *Int. Journal of Mech. Indus. Eng*, Vol. 2, Issue 3, 161–165.
6. Jithendra B., Anil K. M. (2013). Optimization of Weight and Stress Reduction of Dump For Automotive Vehicles. *Int. Journal of Engineering of Res. Technol.*, Vol. 2, 1886–1893.
7. Ramacharan C., Prashanth A. S. (2015). Design and analysis of Dump Truck Floor Bed. *Int. Journal Sci. Res. Dev.*, Vol. 3, 706–710.
8. Kuznecova Eh. S. (Ed.) (1991). *Tekhnicheskaya ehkspluatatsiya avtomobiley*. Moskva : Transport.
9. Pavlov V. A., Mukhanov S. A. (1981). *Transportnihe pricepiv i polupricepiv*. Moskva : Voenizdat.
10. Alyamovskiyj A. A. (2010). *Inzhenernihe raschetih v SolidWorks Simulation*. Moskva : DMK Press.
11. Bocharov N. F., Zuzov V. N., Kurbatskiyj M. I. (1982). *Primenenie EhVM v proektirovanii ram gruzovihkh avtomobileyj : uchebnoe posobie*. Moskva : MVTU.
12. Zenkevich O. (1975). *Metod konechnihkh ehlementov v tekhnike*. Moskva : Mir.
13. Lyashuk O., Pyndus Y., Lutsiv I., Vovk Y., Poberezhna L., Tretiakov O. & Zoloty R. (2019). Fracture cause analysis of the extruders shaft and geometry optimization of the spline. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, Vol. 13, Issue 1, 4449–4460. DOI:10.15282/jmes.13.1.2019.08.0378.
14. Tson O. (2016). Analytical evaluation of technical and operational indicators impact on the transportation technology by automobile trailers. *Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics*, Vol. 1, Issue 1, 23–26. DOI:10.14254/jsdtl.2016.1-1.4.

Ляшук О. Л., Гевко И. Б., Левкович М. Г., Вовк Ю. Я., Сташків Н. Я., Капський Д. В.
ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДНА КУЗОВА
ПОЛУПРИЦЕПА ГРУЗОВОГО АВТОМОБИЛЯ

В статье приведены новые высокоэффективные конструкции грузовых автомобилей, максимально приспособленные для перевозки определенных видов грузов и к конкретным условиям эксплуатации. Статья посвящена совершенствованию технологии проектирования несущих конструкций кузовов грузовых автомобилей. Выполнен обзор и анализ современного состояния теории математического программирования и оптимального проектирования. Предложена численная процедура оптимизации несущих конструкций кузовов грузовых автомобилей.

Проведено исследование влияния геометрических параметров элементов дна кузова на его напряженно-деформированное состояние (НДС) грузового автомобиля с общим применением методов компьютерного моделирования. Исследования проводились средствами инженерного анализа Simulation специализированного программного комплекса SolidWorks на разработанной САД - модели кузова полуприцепа грузового автомобиля. Проведен анализ изменения параметров НДС при изменении геометрических параметров элементов дна кузова. Исследован характер изменения статического напряжения и перемещения в зависимости от изменения пропорций поперечного пересечения швеллера при фиксированных геометрических размерах заготовки и толщины заготовки и материала дна кузова.

По результатам исследований построены графические зависимости изменения статического напряжения, перемещения и коэффициента запаса прочности от ширины полки и толщины швеллера; зависимость статических напряжений в швеллере от толщины стенки швеллера и толщины листа дна кузова. Получено уравнение, описывающее характер изменения напряжений

в швеллерах дна кузова полуприцепа. Результаты проведенных исследований по совершенствованию конструкции кузова грузового автомобиля является основой для принятия инженерных решений по совершенствованию конструкции дна кузова полуприцепа грузового автомобиля, что позволяет максимизировать грузоподъемность и улучшить прочность, уменьшить вес и продлить эксплуатационный ресурс, а также поддерживать технический ресурс полуприцепа при существующей ремонтной базе.

Ключевые слова: дно кузова полуприцепа, швеллер, развертка, статическое напряжение, статическое перемещение, CAD-модель.

Lyashuk O. L., Hevko I. B., Levkovych M. G., Vovk Y. Y., Stashkiv M. Ya., Kapsky D. V.
 INVESTIGATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF A TRUCK SEMI-TRAILER BODY BOTTOM

The article contains new high-performance truck designs best suited for the transportation of certain goods types and for specific operating conditions. The article is devoted to the improvement of the designing technology of load-bearing structures of truck bodies. A review and analysis of the current state of the theory of mathematical programming and optimal design have been carried out. A numerical procedure for optimizing the load-bearing structures of truck bodies has been proposed.

The influence of the truck body bottom elements geometric parameters on its stress-strain state (SSS) has been investigated with the general application of computer modeling methods. The research was carried out by the module Simulation engineering analysis tools of the specialized software SolidWorks on the developed CAD - model of the truck semi - trailer body. The analysis of a change of the stress-strain state parameters at a change of body bottom elements geometrical parameters has been conducted. The nature of static stress and displacement change depending on a change of channel cross section proportions at the fixed geometrical sizes and thickness of a blank and material of a body bottom has been investigated. On the basis of the research results, the graphical dependences of the static stress change, displacement and safety factor (FOS) on the shelf width and channel thickness, as well as the dependence of static stresses in the channel on the channel wall thickness and body bottom sheet thickness are being constructed. An equation that describes the nature of the static stress change in the channels of the body semi-trailer bottom has been obtained. The results of research on improving the design of the truck body provide the basis for engineering solutions to improve the design of the semi-trailer body bottom, which allows to maximize load capacity and improve strength, reduce weight and extend service life, and maintain the technical resource.

Keywords: semi - trailer body bottom, channel, scan, static stress, static displacement, CAD model.

© Ляшук О. Л., Гевко І. Б., Левкович М. Г., Вовк Ю. Я., Сташків М. Я., Капський Д. В.

Статтю прийнято
 до редакції 09.04.21

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

AUTOMATION AND COMPUTER INTEGRATED TECHNOLOGIES

УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМУ ЗМАЩЕННЯ ГОЛОВНОГО ДВИГУНА СУДНА

Наговський Д. А., к.т.н., доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики Херсонської державної морської академії, e-mail: dymon.ksu@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6920-0324;

Доценко Г. Г., к.т.н., доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики, e-mail: hersongala@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1004-4934

Своєчасна та правильно дозована подача масла до циліндрів дизельного двигуна – запорука надійної і тривалої його роботи. В статті розглядається змащування розбризкуванням, яке застосовується для змащення через циліндрові втулки. В статті розглянута перспективність зміни подачі масла до циліндра з використанням наявних технологій фірми MAN B & W.

Авторами проведено аналіз системи змащення суднового головного двигуна MAN -B&W 6S70MC-C8. У статті показана необхідна кількість подачі масла до циліндра, яка підтверджена розрахунками залежно від режиму роботи суднового головного двигуна. В статті зазначено, що основний час судновий головний двигун працює при навантаженні менше 25 % під час сталого режиму роботи при переході. Тому в сталому режимі має сенс зменшення розміру подачі масла до циліндрів, порівнюючи з наявним алгоритмом подачі. Проведені авторами розрахунки довели, що при навантаженні головного двигуна до 25% доцільна кількість подачі масла до циліндра становить від 0,38 г/(кВт·год) до 0,5 г/(кВт·год).

Вказані заходи, також забезпечують поліпшені характеристики змащення, чим підвищують економічні показники завдяки зменшенню експлуатаційних витрат.

Ключові слова: змащення, лубрикатор, автоматизована система змащення, циліндрове масло, інтенсивність змащення

DOI: 10.33815/2313-4763.2021.1.24.106–116

Актуальність проблеми. У будь-якій галузі змащування відіграє найважливішу роль для роботи вузлів обертання. А враховуючи, що 40 % витрат на техобслуговування пов'язані з неякісним змащенням, належне керування цим процесом – завдання першорядної важливості. Правильна кількість і інтервали заміни відповідного масла необхідні для збереження високих робочих характеристик обладнання та максимального збільшення терміну його служби.

Проблематика правильного змащення циліндрів двигуна та управління цим процесом давно не нова, її досліджували такі, як Богач В. М. [1], Возницький І. В. [5], Грибниченко М. В. [6], Осипов О. В. [7], Дейнего Ю. Г. [9], Даничкін В. Н. [11], Проватар А. Г. [12], Зленко М. А. [13], Дорохов А. Ф. [14], Варбанець Р. А. [15] та ін. В цих роботах авторами наведено знання про будову та принципи роботи дизельних суднових енергетичних установок, а також розглянуті питання, що стосуються експлуатації систем, що обслуговують суднові дизелі: охолодження, змащення і подачі палива. Так, наприклад, Богач В.М. [1] представив матеріал щодо вдосконалення робочого процесу, підвищенню ефективності подачі палива і турбонаддування в сучасних суднових дизелях. У його роботі проаналізовано режими і характеристики роботи суднових дизелів, розглянуті методики їх регулювання в експлуатації і подана оцінка механічної і теплової навантаженості з урахуванням роботи системи змащення. В роботах, зазвичай, згадуються нормальний та аварійні режими, але не приділено уваги оптимізації подачі з урахуванням робочих режимів судна.

Окремо можна виділити комп'ютеризацію суднових головних двигунів. Системи впорскування та змащення переходять на новий рівень завдяки датчикам та мікроконтролерам, а також сучасним засобам автоматизації. Одночасно з тим це додає роботи та проблем електромеханікам, адже механік не в змозі визначити несправність електричної частини системи автоматики вищезгаданих об'єктів.

Основною причиною розробки високотехнологічної системи змащення циліндрів є зменшення експлуатаційних витрат двигуна. Та більше, найдорожчі масла, як зазвичай,

використовуються для камери згоряння двигуна як масло для циліндра. Отже, розвиток інтелектуальної системи змащення циліндрів має досконалий сенс.

Об'єктом дослідження виступає процес змащення циліндрів головного двигуна MAN&BW 6S70MC-C8.

Предметом дослідження є дійсна необхідна кількість подачі масла до циліндра при використанні технологій змащення MAN B&W.

Постановка проблеми. Після тривалого часу експлуатації головного двигуна MAN -B&W 6S70MC-C8 для скорочення експлуатаційних витрат та збереження ресурсу власником прийнято рішення заміни наявної системи змащення на Alpha Lubrication System. Тому, само собою виникло питання щодо налаштування цієї системи під конкретний двигун.

Метою цієї роботи є визначення необхідної кількості подачі масла до циліндра та відкорегування алгоритмів подачі згідно з режимом роботи судна та головної енергетичної установки.

Вирішення проблеми. Оскільки в сучасному світі система змащення є електронно-керованою, то її параметри можна досить швидко змінювати. Для двигуна 6S70MC-C8 уже існує фірмова система змащення Alpha Lubrication System, тому вирішено розрахувати необхідну кількість подачі масла до циліндра та відкорегувати алгоритм подачі згідно з режимом роботи судна та головної енергетичної установки.

Система імпульсного змащення – це електронно-керована система змащування масла циліндрів для двигунів, в якій до вкладиша вводиться дозована кількість циліндрового масла залежно від навантаження двигуна. Це гарантує, що точна кількість циліндрового масла поставляється всередину вкладиша в правильному періоді часу для цього конкретного навантаження двигуна. Структурна схема змащення в циліндрі показана на рис. 1.

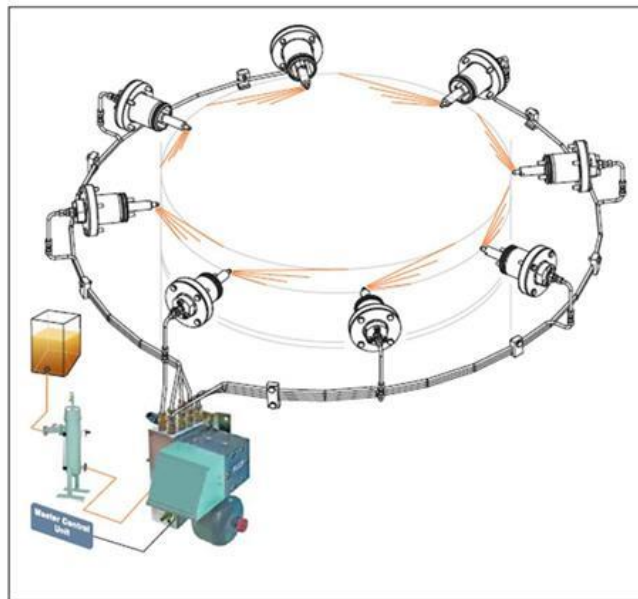


Рисунок 1 – Структурна схема змащення в циліндрі

Фірма MAN Diesel з 2000 р. застосовує альфа-лубрикатори на двигунах серії MC. Управління альфа-лубрикатором електричне, а система управління регулює дозування масла до вмісту сірки в паливі.

Структура електронної системи змащення головного двигуна Alpha Lubricator System показана на рис. 2.

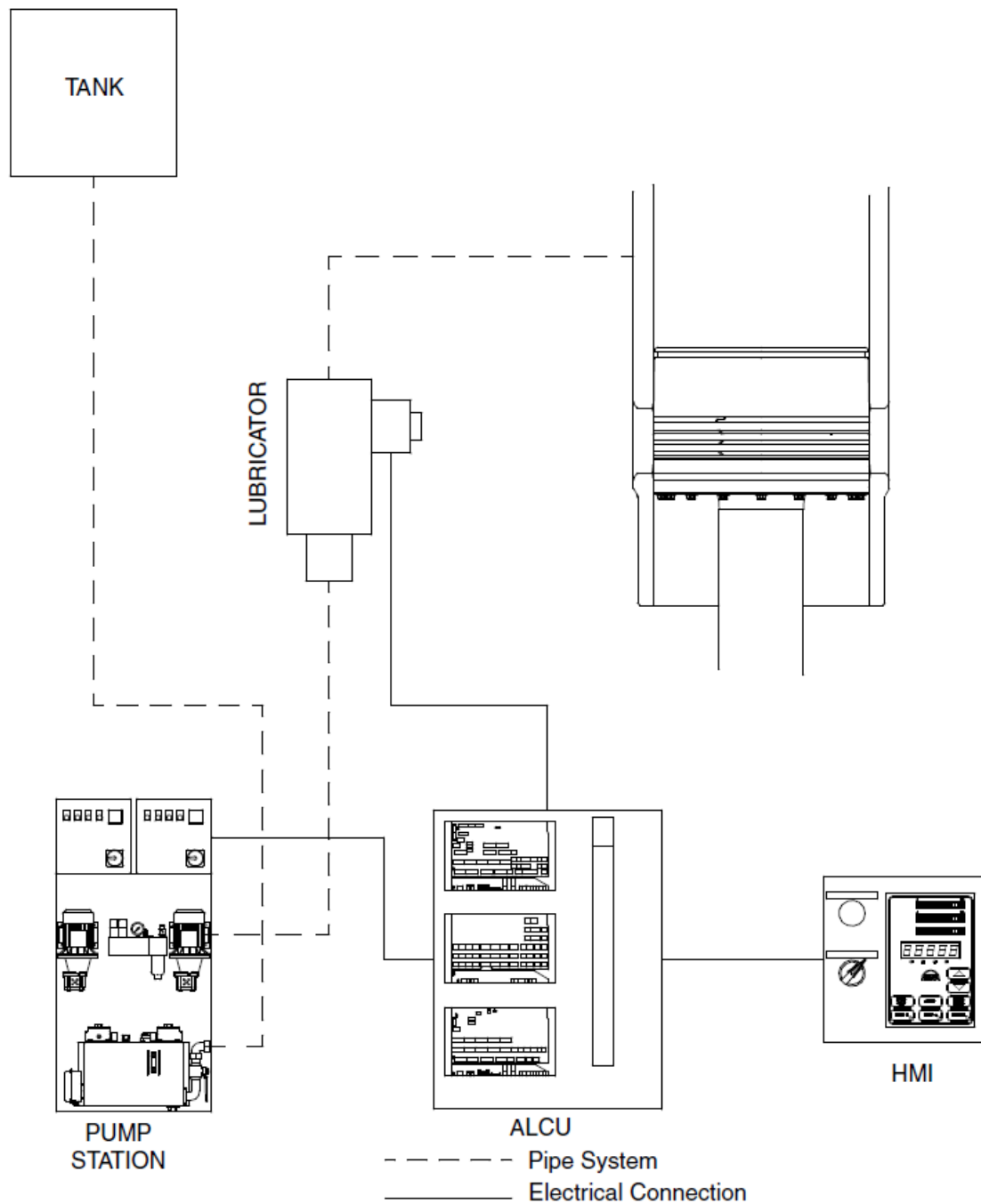


Рисунок 2 – Структура електронної системи змащення головного двигуна MAN&BW Alpha Lubricator System

Система Alpha Lubricator System доступна для всіх двотактних двигунів MAN B&W, має алгоритм, який регулює дозування масла в циліндрі, пропорційне вмісту сірки в паливі. Цей алгоритм має назву Alpha Adaptive Cylinder-Oil Control (Alpha ACC) [2, 3].

Основним блоком управління є блок ALCU (Alpha Lubrication Control Unit). Він виконаний у сталевому корпусі, та складається з трьох основних електронних компонентів для управління процесам змащування [2, 3]:

- MSU (Master Control Unit, головний блок управління);
- BCU (Backup Control Unit, резервний блок управління);
- SBU (Switch Board Unit, щитовий блок).

В Alpha ACC кількість масла в циліндрі контролюється таким способом, що воно пропорційне кількості сірки, що надходить у циліндр з паливом. Наступні два критерії визначають контроль:

- дозування масла в циліндрі повинно бути пропорційне відсотку сірки в паливі;
- дозування масла в циліндрі повинно бути пропорційне навантаженню на двигун (кількості палива, що надходить у циліндри).

Насосна станція складається з двох насосів, що працюють індивідуально, обігрівачів, фільтрів і всмоктувального бака. Джерело живлення пускових панелей насосної станції береться з двох окремих вимикачів, по одному на кожний насос.

Агрегати змащення (Lubrication units), по одному для кожного циліндра, складаються з двох змащувачів (Lubricators) для двигунів з отвором від 98 до 70 мм та з одним змащувачем для середніх та малих двигунів. Кожна мастильна установка оснащена одним акумулятором з попереднім тиском азоту 25...30 бар на вході, а також одним акумулятором на випускному боці кожного змащувача з азотом з попереднім тиском 1,5 бар. Кожна мастильна установка має 3, 4, 5 або 6 мастильних поршнів залежно від типу двигуна, підсилювача зворотного зв'язку (feedback pickup) та електромагнітного клапана.

Як показує практика, зазвичай, споживання масла до циліндра надмірне. Тому для зменшення витрат при використанні Alpha Lubrication необхідно отримати закон управління подачею масла. Розрахунок витрат циліндрового масла в різних умовах експлуатації судна пов'язаний із використанням значної кількості показників і залежностей, дані про які отримуються за допомогою розрахунків на підставі наявних величин, що характеризують елементи гребного гвинта, корпусу судна і головного двигуна. Дані для розрахунку витрати циліндрового масла в різних умовах експлуатації судна наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Дані для розрахунку витрати циліндрового масла

Параметр	Значення
Розміри корпусу судна	
– довжина між перпендикулярами L , м	274
– ширина за міделем B , м	48
– осадка за вантажною маркою T_g , м	14
Характеристики гребного гвинта	
– діаметр D_v , м	7,2
– кількість лопастей Z , шт	4
– дискове відношення θ	0,8
– водотоннажність судна в завантаженні V_g , т	81467
– швидкість повного ходу в завантаженні v_g , вузл	14
– еф. потужність ГД на повному ході $N_{ен}$, кВт	18860
– частота обертання колінчастого валу пса, с-1	91 хв-1 \approx 1,5 с-1
– ККД лінії валопроводу $\eta_{вл}$	0,98

Коефіцієнт повноти корпусу судна визначається за формулою [4]:

$$\delta = \frac{V}{L \cdot B \cdot T_2}, \quad (1)$$

де V – об'ємна водотоннажність судна в завантаженні, м³.

$$V = \frac{V_g}{\rho} = \frac{81467 \cdot 10^3}{1025} = 79480 \text{ м}^3,$$

де ρ – густина морської води, $\rho = 1025 \text{ кг/м}^3$. Тоді:

$$\delta = \frac{79480}{274 \cdot 48 \cdot 14} = 0,43.$$

Приймаємо за базовий номінальний режим роботи пропульсивного комплексу за паспортними даними. Визначаємо коефіцієнт попутного потоку ω і засмокування t за формулами [1, 4]:

$$\omega = 0,11 + 0,16 \cdot \delta \cdot \sqrt{\frac{\sqrt[3]{V}}{D_B}} = 0,11 + 0,16 \cdot 0,43 \cdot \sqrt{\frac{\sqrt[3]{79480}}{7,2}} = 0,28,$$

$$t = 0,6 \cdot (1 + 0,67 \cdot \omega) \cdot \omega = 0,6 \cdot (1 + 0,67 \cdot 0,28) \cdot 0,28 = 0,2$$

Визначаємо величину відносної ходи гребного гвинта на прийнятому номінальному режимі:

$$\lambda_{pn} = \frac{0,515 \cdot v_z \cdot (1 - \omega)}{n_{cn} \cdot D_g} = \frac{0,515 \cdot 14 \cdot (1 - 0,28)}{1,5 \cdot 7,2} = 0,48.$$

Задаємо декількома значеннями λ_p , при цьому одне значення λ_p беремо більше λ_{pn} , а два значення – менше λ_{pn} :

$$\lambda_p = 0,41; \quad \lambda_p = 0,46; \quad \lambda_p = 0,48 \quad \lambda_p = 0,54$$

За кривими дії гребного гвинта визначаємо безрозмірний коефіцієнт упору k_1 і моменту k_2 для кожної вибраної величини λ_p . Отримані значення приведені у вигляді табл. 2.

Таблиця 2 – Залежність коефіцієнтів k_1 і k_2 від величини відносної ходи λ_p

Параметр	Відносна хода λ_p			
	0,41	0,46	0,48	0,54
Безрозмірний коефіцієнт упору k_1	0,222	0,195	0,162	0,127
Безрозмірний коефіцієнт моменту k_2	0,026	0,027	0,021	0,020

Потім задаємось чотирма значеннями частоти обертання вала n , починаючи від $n_c = 0,7 \cdot n_{cn}$ до величин n_c з повного ходу $n_{cnx} = n_{cn} \cdot [1]$:

$$n_{c1} = 1,05 \cdot c^{-1} \quad n_{c1} = 1,15 \cdot c^{-1} \quad n_{c1} = 1,25 \cdot c^{-1} \quad n_{c1} = 1,5 \cdot c^{-1}$$

Для всіх вибраних значень відносної ходи і частоти обертання гребного гвинта (головного двигуна) розраховуємо швидкість судна v у вузлах за формулою [1, 4]:

$$v = \frac{\lambda_p \cdot n_c \cdot D_B}{0,515 \cdot (1 - \omega)}. \quad (2)$$

Ураховуючи, що величини D_B і ω не змінюються, можна цю формулу записати у вигляді:

$$v = \lambda_p \cdot c_1 \cdot n_c, \quad (3)$$

де постійна c_1 дорівнює:

$$c_1 = \frac{D_B}{0,515 \cdot (1 - \omega)} = \frac{7,2}{0,515 \cdot (1 - 0,28)} = 19,4.$$

Проведемо розрахунок ефективної потужності ГД для різних значень відносної ходи λ_p і частоти обертання n_c гвинта, результати занесемо до табл. 3.

Таблиця 3 – Розрахунок зміни ефективної потужності головного двигуна і корисної тяги гребного гвинта

Параметр	Спосіб визначення	$n_c, \text{с}^{-1}$	Відносна хода λ_p			
			0,41	0,46	0,48	0,54
	За кривими дії гребного гвинта		0,222	0,195	0,162	0,127
	За кривими дії гребного гвинта		0,026	0,027	0,021	0,020
Швидкість судна v , вузол	$c_1 = \frac{D_B}{0,515 \cdot (1 - \omega)}$ $c_1 = 19,4$	1,05	8,35	9,37	9,77	11,0
		1,15	9,14	10,26	10,7	12,05
		1,25	9,94	11,15	11,64	13,1
		1,5	11,93	13,38	13,97	15,71
Корисна тяга гребного гвинта P_e , кН	$c_2 = \rho \cdot D_B^4 \cdot (1 - t) \cdot 10^{-3}$ $c_2 = 2257,4$	1,05	547,53	485,31	403,18	316,07
		1,15	656,8	582,15	483,63	379,14
		1,25	776	687,8	571,4	447,95
		1,5	1117,41	990,43	822,82	645,05
Ефективна потужність головного двигуна N_e , кВт	$c_3 = \frac{2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot D_B^5}{\eta_n \cdot \eta_{ВП}} \cdot 10^3$ $c_3 = 131023,19$	1,05	3943,57	4095,24	3185,19	3033,51
		1,15	5181,02	5380,28	4184,66	3985,4
		1,25	6653,52	6909,42	5374	5118,09
		1,5	11497,28	11939,48	9286,26	8844,06

Розрахуємо витрату циліндрового масла за зміною ефективної потужності головного двигуна:

$$B_m = b_{em} \cdot N_e, \quad (4)$$

де b_{em} – швидкість подачі циліндрового масла, 0,6 г/(кВт·год) при використанні Alpha Lubricator та 1,2 г/(кВт·год) для старого варіанта.

Розрахуємо витрату циліндрового масла за формулою (4), підставивши дані N_e з табл. 3. Результати розрахунків занесемо до табл. 4.

Таблиця 4 – Розрахунок витрати циліндрового масла

Ефективна потужність головного двигуна N_e , кВт	Витрата циліндрового масла B_m , кг	Витрата циліндрового масла B_m , кг (старий варіант)
3033,51	1,820	3,640
3185,19	1,911	3,822
3943,57	2,366	4,732
3985,4	2,391	4,782
4095,24	2,457	4,914
4184,66	2,510	5,021
5118,09	3,070	6,141
5181,02	3,108	6,217
5374	3,224	6,448
5380,28	3,228	6,456
6653,52	3,992	7,984
6909,42	4,145	8,291
8844,06	5,306	10,612
9286,26	5,571	11,143
11497,28	6,898	13,796
11939,48	7,136	14,327

Як видно з рис. 3, при навантаженні на двигун нижче за 25 %, швидкість подачі масла до циліндра становить 0,5 г/(кВт·год) і знижується до показника 0,38 при 10 % навантаженні. На рис. 4 побудовано графіки витрати масла за старого та нового варіантів і з 25 % завантаженням двигуна.

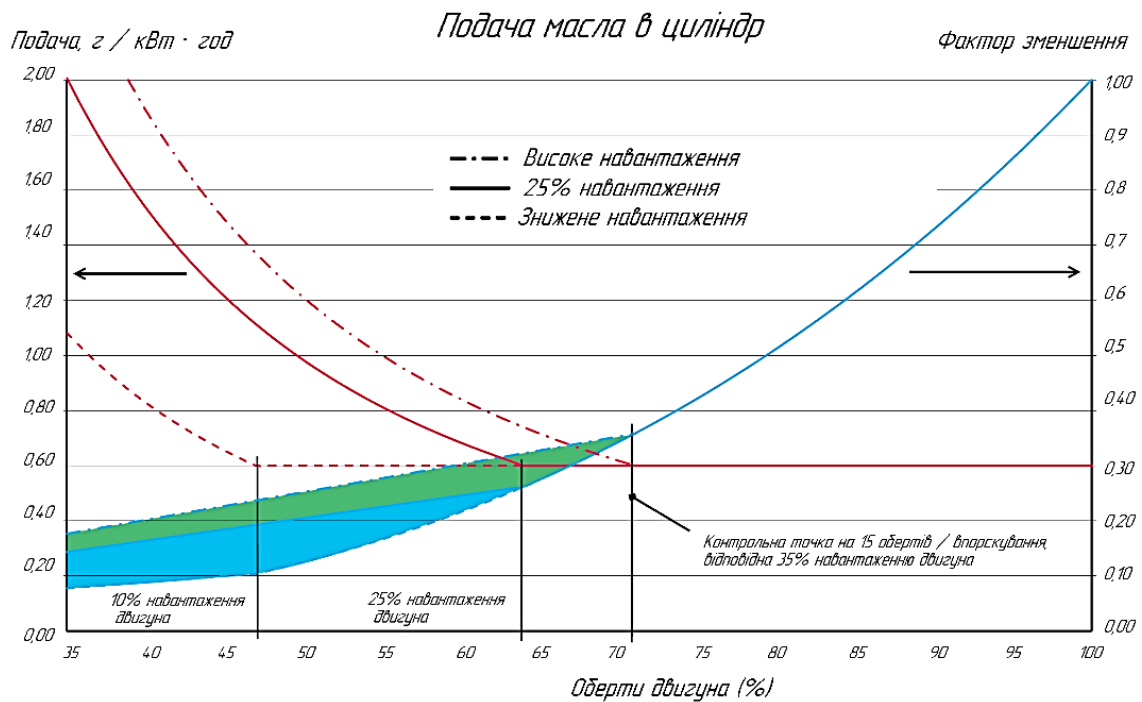


Рисунок 3 – Графік подачі масла в циліндр

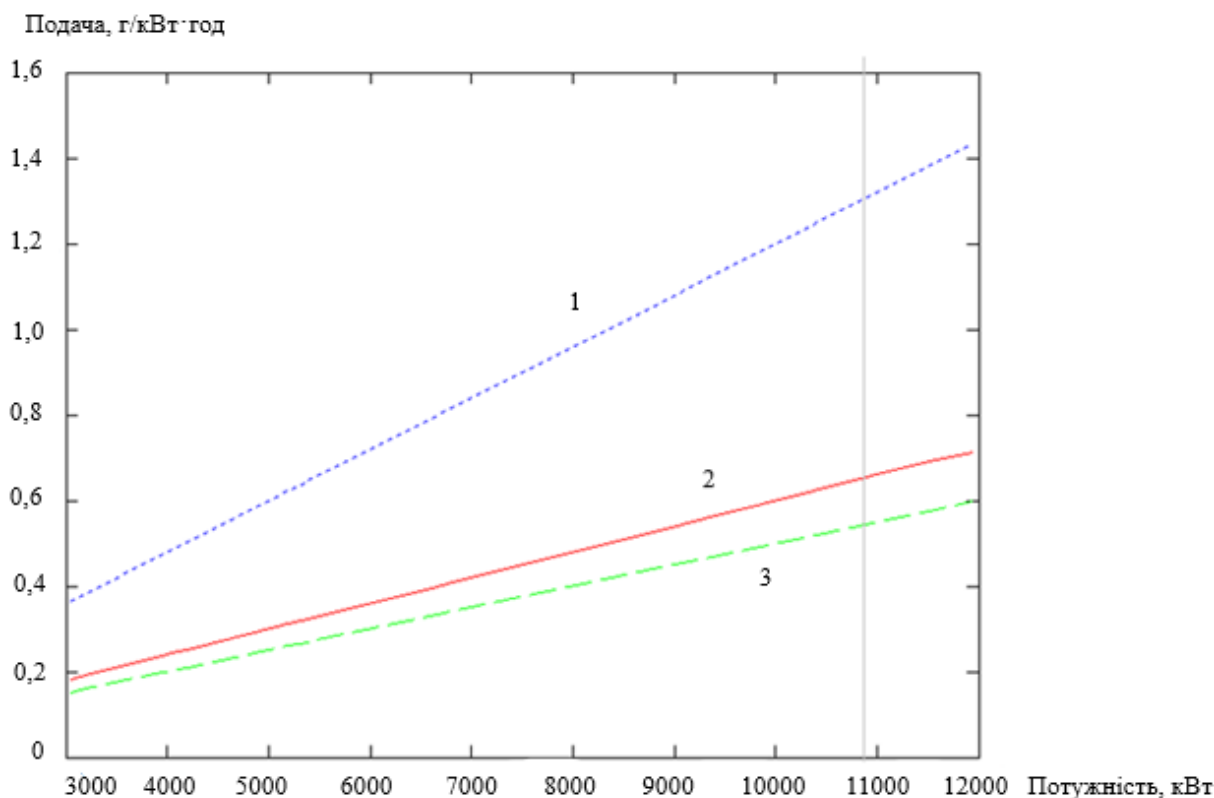


Рисунок 4 – Графік подачі масла в циліндр: 1 – витрати масла за старого варіанта; 2 – витрати масла за нового варіанта; 3 – витрати масла за нового варіанта, 25 % навантаження

Як видно з рис. 4, при сталому режимі навантаження головного двигуна у розмірі 25%, при використанні зроблених розрахунків швидкість подачі масла до циліндра коливається від 0,18 г/(кВт·год) до 0,5 г/(кВт·год). Отримані результати підтверджують достовірність розрахунків.

Висновки. У роботі висвітлена структура та модулі системи змащення суднового головного двигуна MAN – B&W 6S70MC-C8. Ураховуючи з актуальність проблеми та поставленого завдання, за допомогою розрахунків та побудов графічних залежностей показана доцільність удосконалення алгоритму управління автоматизованою системою змащення суднового головного двигуна. Вказані заходи, згідно з розрахунком, забезпечують достатній рівень змащення циліндрів суднового головного двигуна при зменшенні його експлуатаційних витрат, на масло зокрема. Розраховано та побудовано залежності витрати масла від потужності головного двигуна для різних режимів експлуатації при використанні оновленого алгоритму управління автоматизованою системою змащення суднового головного двигуна. Ураховуючи, проведені розрахунки та отримані графіки, визначено, що при навантаженні головного двигуна до 25 % доцільна кількість подачі масла до циліндра становить від 0,38 г/(кВт·год) до 0,5 г/(кВт·год).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Богач В. М., Задорожний А. А., Богач А. В. Исследование маслоподачи в цилиндры двигателей B&W. Судовые энергетические установки : науч.-техн. сб. Одесса : ОНМА, 2004. Вып. 10. С. 14–23.
2. MAN Diesel & Turbo. MAN Diesel & Turbo 2014. URL : [http://www.tribocare.com/pdf/MAN%20Diesel%20and%20Turbo%20SL 2014-571.pdf](http://www.tribocare.com/pdf/MAN%20Diesel%20and%20Turbo%20SL%202014-571.pdf).

3. MAN Diesel & Turbo. Alpha Adaptive Cylinder-oil Control Alpha ACC. URL : <http://www.morehod.ru/forum/download/file.php?id=19604>.
4. Man&BW 6S70MC-C8 Operation Manual, 2009. URL : https://man-es.com/applications/projectguides/2stroke/content/printed/S70MC-C8_2.pdf
5. Возницкий И. В. Судовые двигатели внутреннего сгорания. Том 1. Конструкция двигателей. Санкт-Петербург : Моркнига, 2010. 264 с.
6. Грибиниченко М.В. Судовые энергетические установки : учеб. пособие. Владивосток : ДВГТУ, 2010. 110 с.
7. Осипов О. В. Эксплуатация судовых двигателей внутреннего сгорания : курс лекций : учебное пособие. Владивосток : МГУ им. адм. Г.И. Невельского, 2011. 208 с.
8. Митягин В. Г., Окунев В. Н., Мартыанов В. В. Проблемы эксплуатации судовых дизелей на различных видах топлива. *Журнал Университета водных коммуникаций*. 2011. Вып. 3. С. 49–53.
9. Дейнего Ю. Г. Судовой механик. Технический минимум. Москва : Моркнига, 2008. 304 с.
10. Возницкий И. В. Повреждения и поломка дизелей. Примеры и анализ причин. Санкт-Петербург : Модерн, 2006. 116 с.
11. Даничкин В. Н. Анализ современных систем лубрикаторной смазки крейцкопфных малооборотных дизелей. *Научные труды Дальрыбвтуза*. 2011. № 23. С. 98–108.
12. Проватар А. Г., Будин А. А. Коррозионная и кавитационная стойкость цилиндрических втулок судовых дизелей. *Агентство международных исследований г. Сургут : материалы Международной научно-практической конференции*. 2016. С. 194–205.
13. Зленко М. А., Попович А. А., Мутылина И. Н. Задачи обеспечения износостойкости зеркала цилиндрических втулок судовых двигателей внутреннего сгорания. *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия «Морская техника и технология»*. Астрахань : Издательство АГТУ, 2016. Вып. № 3. С. 44–47.
14. Дорохов А. Ф., Проватар А. Г., Воробьев А. В. Качество и надёжность судовых дизелей. *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия «Морская техника и технология»*. Астрахань : Издательство АГТУ, 2015. № 2. С. 48–55.
15. Varbanets R., Karianskiy A. Analyse of marine diesel engine performance. *Journal of Polish CIMAC. Energetic Aspects*. Gdansk : Faculty of Ocean Engineering and Ship Technology Gdansk University of Technology, 2012. Vol. 7, No 1. P. 269–275.

REFERENCES

1. Bogach V. M., Zadorozhnihyj A. A., Bogach A. V. (2004). Issledovanie maslopodachi v cilindrih dvigateley B&W. *Sudovihe ehnergeticheskie ustanovki : nauch.-tekhn. sb.* Odessa : ONMA, 10, 14–23.
2. MAN Diesel & Turbo. MAN Diesel & Turbo 2014. Retrived from <http://www.tribocare.com/pdf/MAN%20Diesel%20and%20Turbo%20SL%202014-571.pdf>.
3. MAN Diesel & Turbo. Alpha Adaptive Cylinder-oil Control Alpha ACC. Retrived from <http://www.morehod.ru/forum/download/file.php?id=19604>.
4. Man&BW 6S70MC-C8 Operation Manual. Retrived from https://man-es.com/applications/projectguides/2stroke/content/printed/S70MC-C8_2.pdf
5. Boznickiy I. B. (2010). *Sudovihe dvigateli vnutrennego sgoraniya. Tom 1. Konstrukciya dvigateleyj*. Sankt Peterburg : Morkniga.
6. Gribinichenko M. V. (2010). *Sudovihe ehnergeticheskie ustanovki : ucheb. posobie*. Vladivostok : DVG TU.

7. Osipov O. V. (2011). *Ehkspluatatsiya sudovihkh dvigateleyj vnutrennego sgoraniya : kurs lekciyj : uchebnoe posobie*. Vladivostok : MGU im. adm. G.I. Neveljskogo.
8. Mityagin V. G., Okunev V. N., Martjyanov V. V. (2011). Problemih ehkspluatatsii sudovihkh dizeleyj na razlichnihkh vidakh topliva. *Zhurnal Universiteta vodnihkh kommunikacij*, 3, 49–53.
9. Deyjnogo Yu. G. (2008). *Sudovoyj mekhanik. Tekhnicheskijj minimum*. Moskva : Morkniga.
10. Voznickijj I. V. (2006). *Povrezhdeniya i polomka dizeleyj. Primerih i analiz prichin*. Sankt Peterburg : Modern.
11. Danichkin V. N. (2011). Analiz sovremennihkh sistem lubrikatornoj smazki kreyjckopfnihkh malooborotnihkh dizeleyj. *Nauchnihe trudih Daljrihbvtuza*, 23, 98–108.
12. Provatar A. G., Budin A. A. (2016). Korroziionnaya i kavitacionnaya stoyjkostj cilindrovihkh vtulok sudovihkh dizeleyj. *Agentstvo mezhdunarodnihkh issledovaniyj g. Surgut : materialih mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoyj konferencii*, 194–205.
13. Zlenko M. A., Popovich A. A., Mutihlina I. N. (2016). Zadachi obespecheniya iznosostoyjkosti zerkala cilindrovihkh vtulok sudovihkh dvigateleyj vnutrennego sgoraniya. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Morskaya tekhnika i tekhnologiya»*. Astrakhanj : Izdatelstvo AGTU, 3, 44–47.
14. Dorokhov A. F., Provatar A. G., Vorobjov A. V. (2015). Kachestvo i nadyozhnostj sudovihkh dizeleyj. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Morskaya tekhnika i tekhnologiya»*. Astrakhanj : Izdatelstvo AGTU, 2, 48–55.
15. Varbanets R., Karianskiy A. (2012). Analyse of marine diesel engine performance. *Journal of Polish CIMAC. Energetic Aspects*. Gdansk : Faculty of Ocean Engineering and Ship Technology Gdansk University of Technology, Vol. 7, Issue 1, 269–275.

Наговский Д. А., Дощенко Г. Г. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМА СМАЗКИ ГЛАВНОГО ДВИГАТЕЛЯ СУДНА

Своевременная и правильно дозированная подача масла к цилиндрам дизельного двигателя – залог надежной и длительной его работы. В статье рассматривается смазка разбрызгиванием, которая применяется для смазки через цилиндрические втулки. В статье рассмотрена перспективность изменения подачи масла в цилиндр с использованием существующих технологий фирмы MAN B & W. Авторами проведен анализ системы смазки судового главного двигателя MAN –B & W 6S70MC-C8. В статье показано необходимое количество подачи масла к цилиндру, которое подтверждено расчетами в зависимости от режима работы судового главного двигателя.

В статье указано, что основное время судовой главный двигатель работает при нагрузке менее 25 % во время установившегося режима работы при переходе. Поэтому установившемся режиме имеет смысл уменьшения размера подачи масла к цилиндрам по сравнению с существующим алгоритмом подачи. Проведенные авторами расчеты показали, что при нагрузке главного двигателя до 25 % целесообразное количество подачи масла в цилиндр составляет от 0,38 г/(кВт ч) до 0,5 г / (кВт ч).

Указанные меры, в свою очередь, обеспечивают улучшенные характеристики смазки, чем повышают экономические показатели за счет уменьшения эксплуатационных расходов.

Ключевые слова: Смазки, лубрикатор, автоматизированная система смазки, цилиндрическое масло, интенсивность смазки

Nahovsky D. A., Doshchenko H. H. IMPROVING VESSEL'S MAIN ENGINE LUBRICATION ALGORITHM

Timely and accurately dosed oil supply to the cylinders of a diesel engine is the key to its reliable and long-term operation. The article discusses spray lubrication, which is used for lubrication through cylinder liners. The article considers the prospects of changing the oil supply to a cylinder using existing technologies from MAN B&W.

Recently, MAN B&W has focused on further enhancing oil savings. For the purpose of oil consumption reduction, the combustion chamber pressure has been increased in the newly built diesel engines. The

increase in pressure, together with the increase in operating time at low load, led to increased water and acid condensation on cylinder walls, which in turn, initiates low-temperature corrosion in the combustion chamber. Proper and accurate oil dosage supplied by the lubrication system to the cylinder of a main engine allows not only to ensure the correct mode of lubrication of moving parts, but also to protect against corrosion of the cylinder liners surface. The manufacturers recommend that the settings of the cylinder oil supply system be obtained on the basis of service inspections and measurements that allow to obtain data on the wear of the combustion chamber parts (piston rings, liner, and arch). Carrying out service inspections and the subsequent analysis of its results is most often of subjective nature and depends on a training degree of an engineer performing the procedure. Carrying out measurements of the cylinder-piston group details (on many vessels) is also a subject to a number of difficulties (time, measuring tool, etc.)

The authors have performed the analysis of the MAN & BW 6S70MC-C8 main engine lubrication system. The article specifies the required amount of oil to be supplied to the cylinder, as confirmed by the calculations, depending on the mode of ship main engine operation. These measures provide advanced lubrication characteristics, which improve cost efficiency by reducing the cost of the engine repair.

The article states that the main engine of the vessel shall be operated at a load of up to 25%. Therefore, the article has presented the relevant diagrams demonstrating the required amount of oil consumption according to the entire engine characteristics modes.

Keywords: *lubrication, lubricator, automated lubrication system, cylinder oil, lubrication intensity*

© Наговський Д. О., Дощенко Г. Г.

Статтю прийнято
до редакції 19.05.21

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

MATERIALS SCIENCE

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВМІСТУ МОДИФІКАТОРА 2-БЕНЗОФУРАН-1,3-ДИОН НА АДГЕЗІЙНІ ТА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕПОКСИДНИХ КОМПОЗИТІВ

Сапронов О. О., д.т.н., доцент кафедри транспортних технологій та механічної інженерії Херсонської державної морської академії, e-mail: oo.sapronov@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1115-6556;

Соценко В. В., аспірант, асистент кафедри транспортних технологій та механічної інженерії Херсонської державної морської академії, e-mail: sotsenko.vv@gmail.com, ORCID:0000-0003-4384-9373;

Сапронова А. В., аспірантка кафедри транспортних технологій та механічної інженерії Херсонської державної морської академії, e-mail: sapronova.ane4ka@gmail.com, ORCID:0000-0002-4327-4293;

Воробйов П. О., викладач I кваліфікаційної категорії судномеханічного відділення, Морського фахового коледжу Херсонської державної морської академії, e-mail: Vorobyov020291@gmail.com, ORCID:0000-0003-4120-2023;

Яцюк В. М., к.х.н., заступник завідувача відділу дослідження матеріалів, речовин і виробів Тернопільського науково-дослідного експертно-криміналістичного центру МВС України, e-mail: yatsuk-@ukr.net, ORCID: 0000-0002-0103-1250

У роботі наведено технологічні аспекти модифікації епоксидного олігомера DER-331, що забезпечує високі показники надійності та довговічності розроблених полімерів. Досліджено зміну структури адгезійних і фізико-механічних властивостей композитного матеріалу залежно від вмісту модифікатора фталевого ангідриду (2-бензофуран-1,3-діон). Модифікатор вводили в епоксидний олігомер DER-331 за вмісту – $q = 0,10 \dots 3,00$ мас.ч. Для зшивання епоксидної композиції використовували твердник холодного тверднення триетилентетрамін ТЕТА, температура полімеризації становила $T = 393 \pm 2$ К. За результатами експериментальних досліджень встановлено оптимальний уміст модифікатора 2-бензофуран-1,3-діону в епоксидній матриці з полішеними адгезійними властивостями, який складає $q = 0,10$ мас.ч. на 100 мас.ч. олігомера DER-331. Водночас адгезійна міцність при відриві становить $\sigma_a = 40,0$ МПа, а залишкові напруження – $\sigma_z = 1,1$ МПа. Підвищення адгезійних характеристик пов'язано із активацією сегментів макромолекул епоксидного олігомера до взаємодії з C=O групами модифікатора, що на початковому етапі під час фізико-хімічного зшивання забезпечує впорядкованість структури полімеру. Досліджено вплив вмісту модифікатора на значення руйнівних напружень при згинанні (σ_{z2}), модуля пружності при згинанні (E) та ударної в'язкості (W). Показано, що значення руйнівних напружень суттєво залежать від вмісту модифікатора в епоксидному зв'язувачі. Введення незначного вмісту модифікатора до $q = 0,10 \dots 0,50$ мас.ч. у епоксидний зв'язувач забезпечує формування полімерних матеріалів з наступними властивостями: руйнівні напруження при згинанні $\sigma_{z2} = 92,8$ МПа, модуль пружності при згинанні – $E = 3,35$ ГПа, ударна в'язкість – $W = 17,5$ кДж/м². Підвищення показників механічної міцності пов'язано із частковою пластифікувальною дією модифікатора, що забезпечує підвищену рухливість і деформацію макроланцюгів епоксидного олігомера і дозволяє рівномірно розподіляти ударне навантаження по об'єму полімеру.

Ключові слова: епоксидна матриця, модифікатор, твердник, адгезія, фізико-механічні властивості, модуль пружності, ударна в'язкість.

DOI: 10.33815/2313-4763.2021.1.24.118–128

Постановка проблеми. Щороку зростає потреба у розробці нових матеріалів, що характеризуються підвищеними експлуатаційними характеристиками, високими показниками надійності та довговічності. Така тенденція зумовлена досить стрімким розвитком технічного прогресу багатьох галузей промисловості, умов експлуатації технологічного устаткування, режимів його роботи. Для забезпечення вищенаведеного перспективним є використання епоксидних зв'язувачів при формуванні нових полімерних матеріалів з комплексом полішених властивостей [11]. Епоксидна смола є найбільш поширеною як на території України, так і за її межами, та характеризується широким комплексом фізико-механічних, теплофізичних, адгезійних властивостей. Однак постійне

зростання вимоги, які висувають до вже наявних полімерних матеріалів та покриттів на їх основі, спонукають до вдосконалення та підвищення їх експлуатаційних характеристик [1].

Аналіз останніх публікацій та досліджень. Епоксидна смола та її похідні завдяки своїм властивостям, забезпечують різноманітні напрями застосування. Але структура композитів на основі епоксидних зв'язувачів є неоднорідною, тому, незважаючи на певні переваги, не завжди вдається забезпечити високі показники надійності при експлуатації устаткування в умовах впливу навантажень, агресивних середовищ, впливу температури [15]. Саме тому одним з важливих завдань при розробці композитів на основі епоксидних зв'язувачів є застосування модифікаторів та наповнювачів різної фізико-хімічної природи. Введення таких компонентів забезпечує перебіг фізико-хімічних процесів з утворенням надмолекулярних структур при зшиванні композитного матеріалу, що також дозволяє поліпшити експлуатаційні характеристики розроблених матеріалів [2]. Водночас оптимальне співвідношення всіх компонентів полімерної системи дозволяє формувати матеріали з прогнозованими властивостями. Враховуючи вищенаведене, актуальним є дослідження впливу нового модифікатора на адгезійні та фізико-механічні властивості композитного матеріалу.

Мета роботи – дослідити вплив модифікатора 2-бензофуран-1,3-діон на структуру і властивості епоксидних композитів.

Матеріали та методика дослідження. Для формування полімерних матеріалів використовували епоксидний зв'язувач DER-331. Для зшивання епоксидного зв'язувача використано твердник холодного тверднення триетилентетрамін ТЕТА (ТУ 6 – 02 – 1099 - 83), вміст якого становив $-q = 10$ мас.ч. (указано на 100 мас.ч. епоксидної смоли DER-331). Структурну формулу компонентів наведено на рис. 1 та 2 відповідно [4].

Для поліпшення структури і властивостей композитів використовували модифікатор 2-бензофуран-1,3-діон – фталевий ангідрид (далі за текстом ФА), який вводили у зв'язувач за вмісту від $q = 0,10 \dots 3,00$ мас.ч. (тут і далі за текстом мас. ч. наводять на 100 мас.ч. епоксидного олігомера DER-331). Молекулярна формула цього модифікатора – $C_8H_4O_3$. Структурну формулу модифікатора наведено на рис.3.

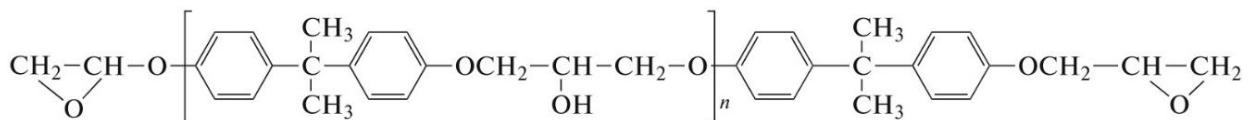


Рисунок 1 – Загальна структурна формула епоксидного олігомера DER-331

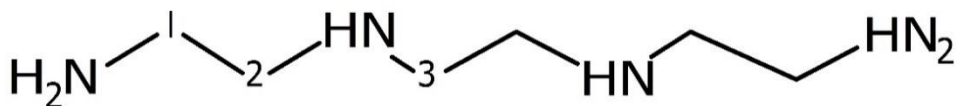


Рисунок 2 – Фрагмент структурної формули ТЕТА

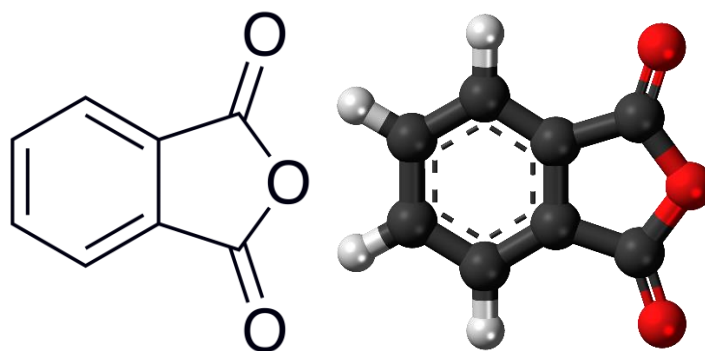


Рисунок 3 – Структурна формула модифікатора 2-бензофуран-1,3-діон ($C_8H_4O_3$)

Формування модифікованої епоксидної матриці виконували у послідовності, описаній у працях [7, 16].

У роботі досліджували: адгезійну міцність; руйнівні напруження і модуль пружності при згинанні; ударну в'язкість; структуру композитів, аналізуючи характер їх руйнування, за методиками, описаними у працях [7, 9, 12, 14, 16].

Результати дослідження та їх обговорення. Для визначення впливу вмісту модифікатора ФА в епоксидному олігомері DER-331 проведено комплексні дослідження. Треба зазначити, що значення адгезійних та фізико-механічних властивостей [6] вихідної (не модифікованої) епоксидної матриці становили: адгезійна міцність при відриві – $\sigma_a = 36,9$ МПа, руйнівні напруження при згинанні – $\sigma_{32} = 80,0$ МПа, модуль пружності при згинанні – $E = 2,8$ ГПа, ударна в'язкість – $W = 13,5$ кДж/м², залишкові напруження – $\sigma_3 = 1,40$ МПа.

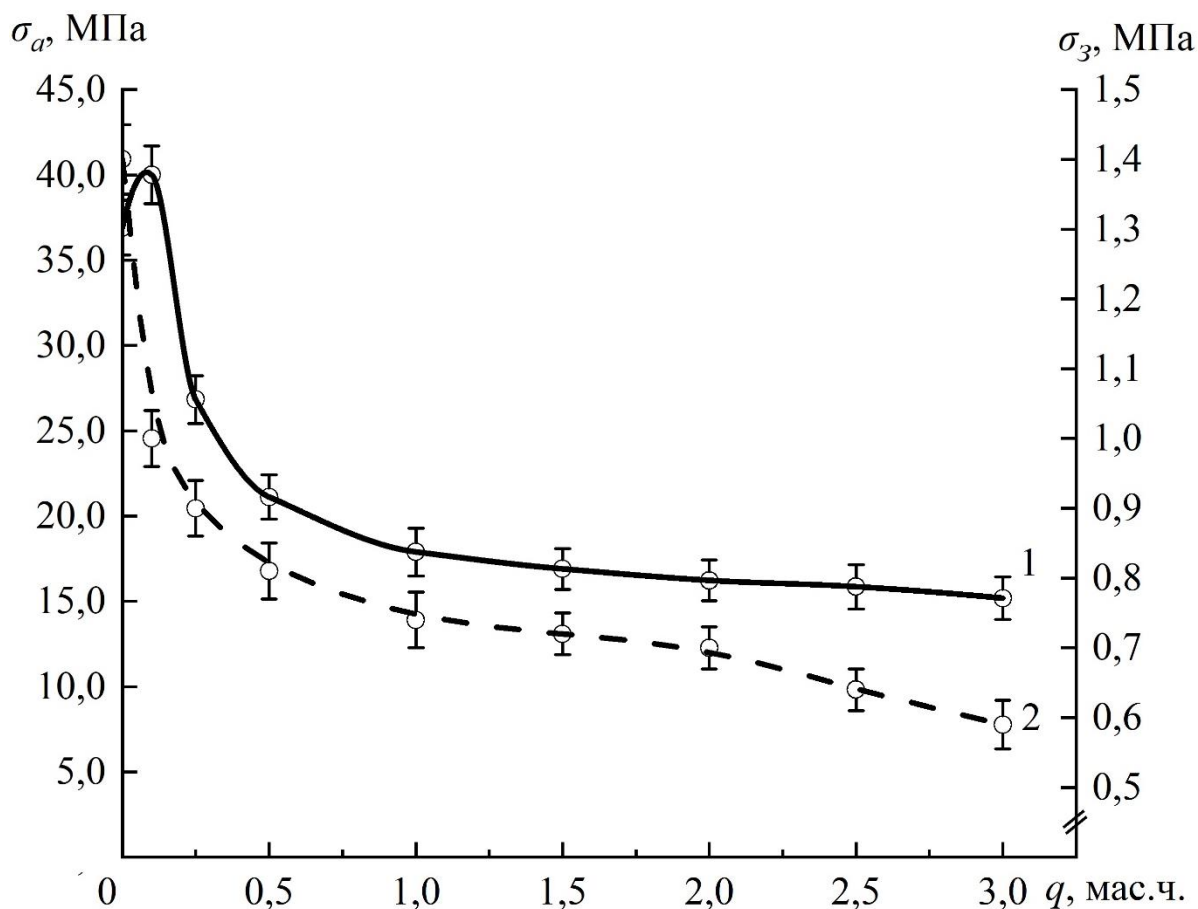


Рисунок 4 – Залежність адгезійної міцності при відриві (σ_a) та залишкових напружень (σ_3) від вмісту модифікатора 2-бензофуран-1,3-діон:
1 – адгезійна міцність при відриві (σ_a); 2 – залишкові напруження (σ_3)

Установлено, що при введенні модифікатора у епоксидний зв'язувач за вмісту $q = 0,10$ мас.ч., спостерігали максимальне значення адгезійної міцності, що становить – $\sigma_a = 40,0$ МПа (рис. 4, крива 1). Уважали, що за такого вмісту активуються до взаємодії сегменти макромолекул епоксидного олігомера з активними до взаємодії С=О групами модифікатора, що на початковому етапі під час фізико-хімічного зшивання забезпечує впорядкованість структури [14]. При збільшенні вмісту модифікатора з $q = 0,25$ мас.ч. до $q = 3,00$ мас.ч. спостерігали монотонне зниження адгезійної міцності до $\sigma_a = 15,18 \dots 27,5$ МПа. Уважали, що зниження показників адгезійної міцності при відриві, можна пояснити дефектною структурою полімеру, яка сформувалася за недостатньої взаємодії епоксидних груп [9] через перенасичення вмісту модифікатора в епоксидній системі «матриця-модифікатор».

Одним з важливих показників при розробці захисного покриття є значення залишкових напружень як основної характеристики довговічності матеріалу. Показано, що введення модифікатора за вмісту $q = 0,10 \dots 3,00$ мас.ч. призводить до зниження значень залишкових напружень порівняно із вихідною матрицею з $\sigma_3 = 1,40$ МПа до $\sigma_3 = 0,59 \dots 1,00$ МПа (рис. 4, крива 2).

В результаті експериментальних досліджень було визначено оптимальний вміст модифікатора 2-бензофуран-1,3-діону в епоксидній матриці з поліпшеними адгезійними властивостями, який складає $q = 0,10$ мас.ч. на 100 мас.ч. олігомера DER-331. Водночас адгезійна міцність при відриві становить $\sigma_a = 40,0$ МПа, а залишкові напруження – $\sigma_3 = 1,1$ МПа.

Далі досліджували вплив модифікатора ФА на значення руйнівних напружень при згинанні (σ_{3z}), модуля пружності при згинанні (E) та ударної в'язкості (W). Доведено, що значення руйнівних напружень суттєво залежать від вмісту модифікатора в епоксидному зв'язувачі (рис. 5, крива 2). Зазначимо, що при введенні незначного вмісту модифікатора – $q = 0,10$ мас.ч., спостерігали максимальне значення руйнівних напружень при згинанні ($\sigma_{3z} = 92,8$ МПа), що в 1,1 раза є більшим за встановлене значення цієї характеристики для вихідної матриці ($\sigma_{3z} = 80,0$ МПа). Уважали, що це зумовлено хімічною взаємодією функціональних груп епоксидного зв'язувача та модифікатора при їх зшиванні [12]. При подальшому збільшенні вмісту модифікатора ФА в епоксидному зв'язувачі до $q = 0,25 \dots 3,00$ мас.ч. спостерігали монотонне зниження показників руйнівних напружень, які коливаються в межах $\sigma_{3z} = 74,4 \dots 80,5$ МПа.

Аналіз впливу вмісту модифікатора на модуль пружності (рис. 5, крива 1) дозволяє стверджувати, що при введенні ФА за вмісту $q = 0,10 \dots 0,25$ мас.ч. значення модуля пружності знаходяться в межах $E = 2,9 \dots 3,0$ ГПа, що на $\Delta E = 0,2$ ГПа перевищують початкові значення вихідної матриці. Максимум на кривій залежності модуля пружності від вмісту ФА встановлено при введенні $q = 0,50$ мас.ч. модифікатора. У такому випадку модуль пружності модифікованої матриці становить – $E = 3,35$ ГПа. Можна припустити, що підвищення пружних характеристик композиту пов'язано із частковою пластифікувальною дією модифікатора, що забезпечує підвищену рухливість і деформацію макроланцюгів олігомера [8]. Однак збільшення вмісту ФА до $q = 1,00 \dots 3,00$ мас.ч. призводить до перенасичення системи модифікатором та характеризується погіршеними когезійними властивостями матеріалу. За такого вмісту ФА спостерігали значення модуля пружності при згинанні $E = 2,9 \dots 3,2$ ГПа. Треба зазначити, що навіть при максимальному вмісті модифікатора отримані показники модуля пружності є більшими, порівнюючи з вихідною матрицею.

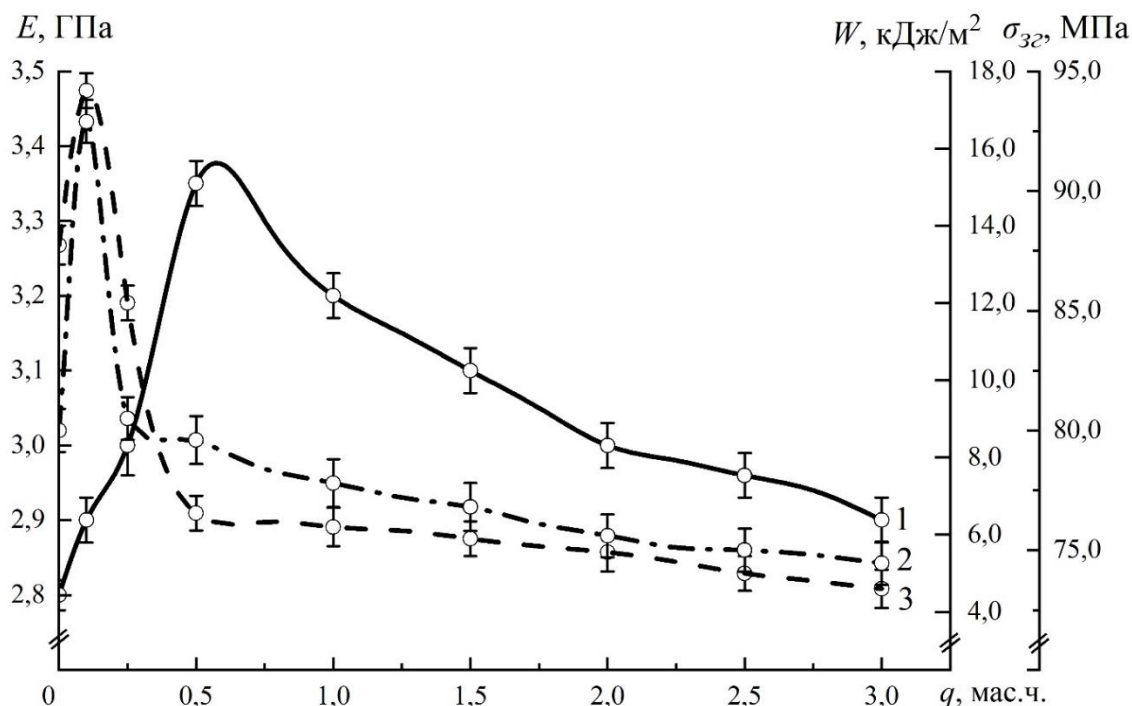


Рисунок 5 – Залежність модуля пружності при згинанні (E), руйнівних напружень при згинанні (σ_{32}) та ударної в'язкості (W) від вмісту модифікатора 2-бензофуран-1,3-діон: 1 – модуль пружності при згинанні (E); 2 – руйнівні напруження при згинанні (σ_{32}); 3 – ударна в'язкість (W)

Загальновідомо [7], що при експлуатації деталей або покриттів на епоксидній основі в умовах впливу різноманітних фізико-хімічних та механічних факторів відбувається поширення тріщиноподібних дефектів, зниження когезійних властивостей та в подальшому руйнування матеріалу. Тому додатково проведено випробування ударної в'язкості розроблених модифікованих матриць та дослідження характеру їх руйнування.

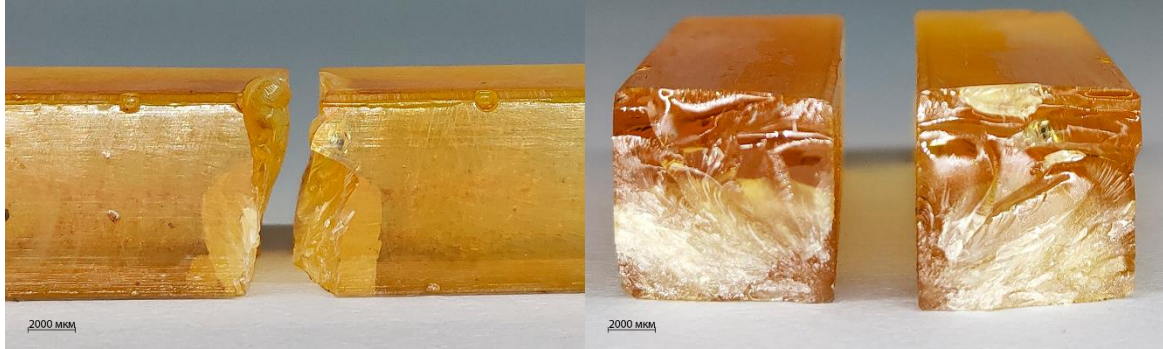
Експериментально встановлено, що при введенні модифікатора за вмісту $q = 0,10$ мас.ч., спостерігали максимальне значення ударної в'язкості, яке становить – $W = 17,5$ кДж/м², що також перевищує значення немодифікованої матриці на $\Delta W = 4$ кДж/м². Аналіз поверхні руйнування модифікованої матриці (рис. 6, б) після ударного руйнування дозволив виявити рівномірне поширення тріщин (з точки удару) по всій площині полімеру. Це свідчить про рівномірний розподіл навантаження ударного характеру по об'єму полімеру завдяки високому ступеню зшивання. Тоді як для вихідної матриці (рис. 6, а) спостерігали початкову траєкторію тріщин подібного характеру, де тріщини переходять у рельєфні заглиблення [13].

При збільшенні вмісту ФА до $q = 0,25$ мас.ч. значення ударної в'язкості зменшується до $W = 12,0$ кДж/м² (коливається в межах вихідної епоксидної матриці). Характер руйнування матриці (рис. 6, в) з досить яскраво вираженими глибокими та розгалуженими тріщинами. Додатково можна спостерігати рівномірні по всій площині заглибини, що свідчать про підвищений рівень концентраторів напружень в об'ємі полімеру [10].

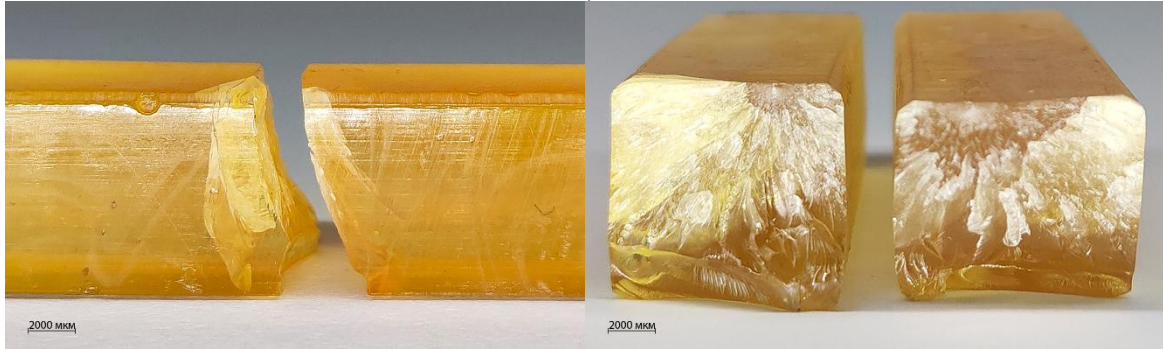
Подальше збільшення вмісту модифікатора в епоксидному зв'язувачі до $q = 0,50 \dots 3,00$ мас.ч. призводить до монотонного зниження показників ударної в'язкості, які становлять – $W = 4,60 \dots 6,58$ кДж/м². Імовірно, отриманий результат можна пояснити надлишковим вмістом частинок ФА, що підвищує крихкість полімерної системи та водночас сповільнює утворення зв'язків між полімерними ланцюгами. У результаті цього утворюються концентратори напружень, що забезпечують формування дефектів (точкових і лінійних пор) у об'ємі полімеру і, як результат, збільшення золь-фракції. Аналіз наведених світлин зламу (рис. 6, г-е) дозволяє підтвердити наведені припущення. Зі збільшенням вмісту модифікатора поверхня характеризується дефектною структурою з великою площею

хаотичних тріщин, пологих поверхонь, точкових та лінійних дефектів, що призводить до зниження показників міцності модифікованих полімерних матриць [5].

Отже, можна зробити висновок, що введення модифікатора за мінімального ($q = 0,10$ мас.ч.) вмісту забезпечує формування модифікованої матриці з підвищеними значеннями ударної в'язкості. Це можна пояснити здатністю модифікатора (за мінімального вмісту) рівномірно й однорідно розподілятися у об'ємі композиції, що також призводить до швидкої реакційної здатності молекул взаємодіяти між собою і, як наслідок, утворення міцно зшитої тривимірної полімерної сітки, що формує матеріал з підвищеними фізико-механічними властивостями [3].



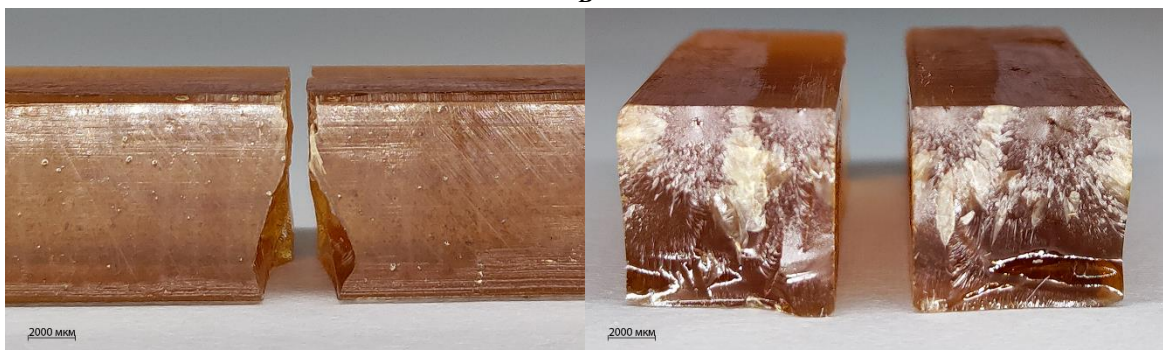
a)



б)



B



Г)

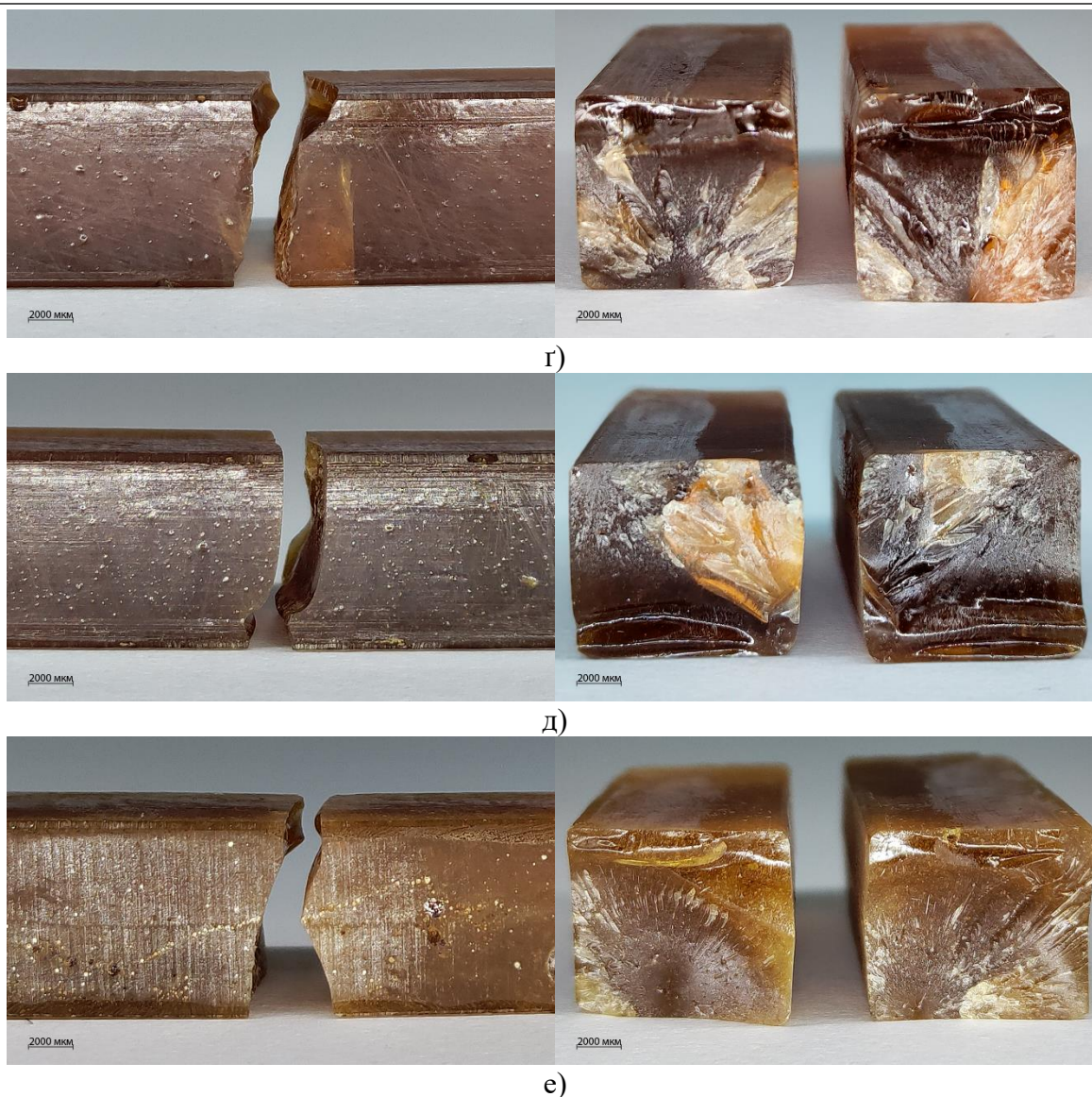


Рисунок 6 – Вигляд поверхні зламу, модифікованих частинками 2-бензофуран-1,3-діон (указано на 100 мас.ч. епоксидної смоли DER-331) епоксидних матриць:
а) вихідна матриця; б) 0,10; в) 0,25; г) 0,50; г) 1,00; д) 2,00; е) 3,00

Висновки. На основі проведених комплексних досліджень установлено наступне:

1. Для отримання матриці з підвищеними адгезійними властивостями необхідно у епоксидний зв'язувач вводити модифікатор 2-бензофуран-1,3-діон за вмісту $q = 0,10$ мас.ч. на 100 мас.ч. олігомера DER-331 та 10 мас.ч. твердника ТЕТА, що забезпечує взаємодію активних С=О груп модифікатора до фізико-хімічної взаємодії із епоксидним олігомером ЕД-20. Такий матеріал характеризується наступними властивостями: адгезійна міцність при відриві – $\sigma_a = 40,0$ МПа, залишкові напруження $\sigma_z = 1,1$ МПа.

2. Доведено, що для формування матриці з поліпшеними фізико-механічними властивостями необхідно у епоксидний олігомер DER-331 (100 мас.ч.) вводити модифікатор 2-бензофуран-1,3-діон за вмісту $q = 0,10 \dots 0,50$ мас.ч., що забезпечує підвищену рухливість і деформацію макроланцюгів олігомера, внаслідок чого підвищуються пружні характеристики композиту. У такому випадку при полімеризації твердником ТЕТА (10 мас.ч.) формується матеріал з наступними властивостями: руйнівні напруження при згинанні $\sigma_{ze} = 92,8$ МПа, модуль пружності при згинанні – $E = 3,35$ ГПа, ударна в'язкість – $W = 17,5$ кДж/м².

3. На основі представлених світлин зламу модифікованих матриць показано, що раціональне введення модифікатора 2-бензофуран-1,3-діон дозволяє рівномірно

розподіляти ударне навантаження по об'єму полімеру, про що свідчить однорідний характер руйнування матеріалу без різнорідних дефектів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Chistyakov E. M., Terekhov I. V., Shapagin A. V., Filatov S. N., Chuev, V. P. Curing of Epoxy Resin DER-331 by Hexakis (4-acetamidophenoxy)cyclotriphosphazene and Properties of the Prepared Composition. *Polymers*. 2019. Vol. 11 (7), 1191. DOI:10.3390/polym11071191.
2. Elmore J. D., Kincaid D. S., Komar P. C., Nielsen, J. E. Waterborne epoxy protective coatings for metal. *Journal of Coatings Technology*. 2002. 74 (8), P. 63–72. DOI:10.1007/bf02697969.
3. Kausar A. Performance of corrosion protective epoxy blend-based nanocomposite coatings: a review. *Polymer-Plastics Technology and Materials*. 2020. 59 (6). P 658–673. DOI: 10.1080/25740881.2019.1673410
4. Mochalova E. N., Limarenko N. A., Galikhanov M. F., Deberdeev R. Y. Effect of the amount of curing agent, curing temperature, and polarization on physicomechanical characteristics of epoxyamine adhesive compositions based on DER-331 oligomer. *Polymer Science Series D*. 2016. Vol. 9(4), P. 396–401. DOI:10.1134/s1995421216040122.
5. Odarczenko M., Thakare D., Li W., Yang K., Tang S., Venkateswaran S. P., White S. R. Self-Protecting Epoxy Coatings with Anticorrosion Microcapsules. *ACS Omega*. 2018. 3 (10). P. 14157–14164. DOI:10.1021/acsomega.8b01950.
6. Sapronov O., Maruschak P., Sotsenko V., Buketova N., De Deus A. B. D. G., Sapronova A., Prentkovskis O. Development and Use of New Polymer Adhesives for the Restoration of Marine Equipment Units. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020. Vol. 8 (7). P. 527. DOI:10.3390/jmse8070527.
7. Stukhlyak D. P., Yakushchenko S. V. Influence of nanoparticles on the physical and mechanical properties of modified epoxy-composite coatings. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*. 2018. Vol. 5, № 1. P. 14–21.
8. Букетов А. В., Кулініч В. Г., Сметанкін С. А., Букетова Н. М., Яцюк В. М. Вплив модифікаторів $C_{13}H_{12}Cl_2N_2TA$ $C_{13}H_{14}N_2$ на механічні властивості епоксидної матриці. *Наукові нотатки*. 2019. Вип. 66. С. 37–45.
9. Елбакієва А. В., Трегубенко М. В., Костромина Н. В., Івашкіна В. Н. Свойства эпоксидных связующих, модифицированных поливинилформальэтилатем. *Успехи в химии и химической технологии : сб. научных трудов*. Москва, 2018. Том 32. № 6. С. 202.
10. Захаров Н. М., Алушкіна Т. В. Оптимизация состава защитных покрытий на основе эпоксидных смол. *Нефтегазовое дело : электронный научный журнал*. Уфа : Сетевое издание «Нефтегазовое дело». 2002. URL : http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Zakharov/zak_2.pdf
11. Сметанкін С. О., Нігалатій В. Д., Букетов А. В., Шарко О. В., Скирденко О. І., Баглюк Г. А. Розробка модифікованих полімерних композитів для ремонту деталей енергетичних установок транспортних систем. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2016. № 1 (14). С. 252–261.
12. Ходаковський О. В., Амелін М. Ю., Букетова Н. М., Сапронов О. О., Яцюк В. М. Дослідження фізико-механічних властивостей модифікованих парааміноазобензолом епоксидних композитів для ремонту засобів транспорту. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2017. № 1 (16). С. 113–120.
13. Якущенко С. В., Гусев В. М., Стухляк Д. П. Дослідження адгезійної міцності і залишкових напружень епоксидних нанокompозитів. *Вісник ХНТУ*. 2018. № 3 (66). Том 2. С. 326–331.

14. Яцишин О. І., Червінський Т. І., Братичак М. М. Вивчення структурування епоксидної смоли ЕД-20 у присутності реакційноздатних олігомерів. *Вісник Львівської політехніки «Хімія, технологія речовин та їх застосування»*. 2012. № 726. С. 467–471.

15. Saprnov O. O., Sotsenko V. V., Antonio B., Smetankin S.O., Yurenin K. Yu. Polymeric materials based on epoxy oligomer DER-331 and hardeners of different physical and chemical nature for repairing of gas production equipment. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*. 2020. Vol. 7 (2). P. 54–60.

REFERENCES

1. Chistyakov E. M., Terekhov I. V., Shapagin A. V., Filatov S. N. & Chuev V. P. (2019). Curing of Epoxy Resin DER-331 by Hexakis (4-acetamidophenoxy)cyclotriphosphazene and Properties of the Prepared Composition. *Polymers*, Vol. 11 (7), 1191. DOI:10.3390/polym11071191.

2. Elmore J. D., Kincaid D. S., Komar P. C., Nielsen J. E. (2002). Waterborne epoxy protective coatings for metal. *Journal of Coatings Technology*, 74 (8), 63–72. DOI:10.1007/bf02697969.

3. Kausar A. (2020). Performance of corrosion protective epoxy blend-based nanocomposite coatings : a review. *Polymer-Plastics Technology and Materials*. 2020. 59 (6). P 658–673. DOI: 10.1080/25740881.2019.1673410.

4. Mochalova E. N., Limarenko N. A., Galikhanov M. F. & Deberdeev R. Y. (2016). Effect of the amount of curing agent, curing temperature, and polarization on physicomechanical characteristics of epoxyamine adhesive compositions based on DER-331 oligomer. *Polymer Science Series D*, Vol. 9 (4), 396–401. DOI:10.1134/s1995421216040122.

5. Odarczenko M., Thakare D., Li W., Yang K., Tang S., Venkateswaran S. P. & White S. R. (2018). Self-Protecting Epoxy Coatings with Anticorrosion Microcapsules. *ACS Omega*, 3(10), 14157–14164. DOI:10.1021/acsomega.8b01950.

6. Saprnov O., Maruschak P., Sotsenko V., Buketova N., De Deus A. B. D. G., Saprnova A. & Prentkovskis O. (2020). Development and Use of New Polymer Adhesives for the Restoration of Marine Equipment Units. *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol. 8 (7), 527. DOI:10.3390/jmse8070527.

7. Stukhlyak D. P., Yakushchenko S. V. (2018). Influence of nanoparticles on the physical and mechanical properties of modified epoxy-composite coatings. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*, Vol. 5, 1, 14–21.

8. Buketov A. V., Kulinich V. H., Smetankin S. A., Buketova N. M. & Yatsiuk V. M. (2019). Vplyv modyfikatoriv C13H12CL2N2TA C13H14N2 na mekhanichni vlastyivosti epoksydnoi matrytsi. *Naukovi notatky*, 66, 37–45.

9. Elbakieva A. V., Tregubenko M. V., Kostromina N. V. & Ivashkina V. N. (2018). Svoystva ehpoksidnykh svyazuyuthikh, modifitsirovannykh polivinilformaljehtilalem. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii : sb. naukovykh trudov*, 32,6, 202. Moskva.

10. Zakharov N. M., Alushkina T. V. (2002). Optimizatsiya sostava zathitnykh pokrihtiy na osnove ehpoksidnykh smol. *Neftegazovoe delo : ehlektronnnyy nauchnyy zhurnal*. Retrived from http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Zakharov/zak_2.pdf

11. Smetankin S. O., Nihalatii V. D., Buketov A. V., Sharko O. V., Skyrdenko O. I. & Bahliuk H. A. (2016). Rozrobka modyfikovanykh polimernykh kompozytiv dlia remontu detalei enerhetychnykh ustanovok transportnykh system. *Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii*, 1 (14), 252–261.

12. Khodakovskiy O. V, Amelin M. Yu., Buketova N. M., Saprnov O. O. & Yatsiuk V. M. (2017). Doslidzhennia fizyko-mekhanichnykh vlastyvostei modyfikovanykh paraaminoazobenzolom epoksydnykh kompozytiv dlia remontu zasobiv transportu. *Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii*, 1 (16), 113–120.

13. Yakushchenko S. V., Husiev V. M., Stukhliak D. P. (2018). Doslidzhennia adheziinoi mitsnosti i zalyshkovykh napruzhen epoksydnykh nanokompozytiv. *Visnyk KhNTU*, 3 (66), 2, 326–331.
14. Yatsyshyn O. I., Chervinskyi T. I., Bratyshak M. M. (2012). Vyvchennia strukturuvannia epoksydnoi smoly ED-20 u prysutnosti reaktsiinozdatnykh olihomeriv. *Visnyk Lvivskoi politekhniki «Khimii, tekhnolohiia rechovyn ta yikh zastosuvannia»*, 726, 467–471.
15. Sapronov O. O., Sotsenko V. V., Antonio B., Smetankin S.O. & Yurenin K. Yu. (2020). Polymeric materials based on epoxy oligomer DER-331 and hardeners of different physical and chemical nature for repairing of gas production equipment. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*, 7(2), 54–60.

Сапронов А. А., Соценко В. В., Сапронова А. В., Воробьев П. А., Яцюк В. Н. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОДЕРЖАНИЯ МОДИФИКАТОРА 2-БЕНЗОФУРАН-1,3-ДИОН НА АДГЕЗИОННЫЕ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТОВ

В работе приведены технологические аспекты модификации эпоксидного олигомера DER-331, что обеспечивает высокие показатели надежности и долговечности разработанных полимеров. Исследовано изменение структуры, адгезионных и физико-механических свойств композитного материала в зависимости от содержания модификатора фталевого ангидрида (2-бензофуран-1,3-дион). Модификатор вводили в эпоксидный олигомер DER-331 в количестве – $q = 0,10...3,00$ масс.ч. Для сшивания эпоксидной композиции использовали отвердитель холодного отверждения триэтиленetetрамин ТЭТА, температура полимеризации при этом составляла $T = 393 \pm 2$ К. По результатам экспериментальных исследований установлено оптимальное содержание модификатора 2-бензофуран-1,3-диона в эпоксидной матрице с улучшенными адгезионными свойствами, который составляет $q = 0,10$ масс.ч. на 100 масс.ч. олигомера DER-331. При этом адгезионная прочность при отрыве составляет $\sigma_a = 40,0$ МПа, а остаточные напряжения – $\sigma_z = 1,1$ МПа. Повышение адгезионных характеристик связано с активацией сегментов макромолекул эпоксидного олигомера к взаимодействию с $C=O$ группами модификатора, что на начальном этапе при физико-химическом сшивании обеспечивает упорядоченность структуры полимера. Исследовано влияние содержания модификатора на значение разрушающих напряжений при изгибе ($\sigma_{из}$), модуля упругости при изгибе (E) и ударной вязкости (W). Показано, что значение разрушающих напряжений существенно зависят от содержания модификатора в эпоксидном связующем. Введение незначительного содержания модификатора до $q = 0,10...0,50$ масс.ч. в эпоксидное связующие обеспечивает формирование полимерных материалов со следующими свойствами: разрушительные напряжения при изгибе $\sigma_{из} = 92,8$ МПа, модуль упругости при изгибе – $E = 3,35$ ГПа, ударная вязкость – $W = 17,5$ кДж/м². Повышение показателей механической прочности связано с частичным пластифицирующим действием модификатора, обеспечивает повышенную подвижность и деформацию макроцепи эпоксидного олигомера и позволяет равномерно распределять ударную нагрузку по объему полимера.

Ключевые слова: эпоксидная матрица, модификатор, отвердитель, адгезия, физико-механические свойства, модуль упругости, ударная вязкость.

Sapronov O.O., Sotsenko V.V., Sapronova A.V., Vorobiov P.O., Yatsyuk V.M. INVESTIGATION OF THE EFFECT OF MODIFIER 2-BENZOFURAN-1,3-DIONE ON ADHESIVE AND PHYSICAL/MECHANICAL PROPERTIES OF EPOXY COMPOSITES

The technological aspects of epoxy oligomer DER-331 modification have been given in the work. It provides high reliability and durability of the developed polymers. The influence of the phthalic anhydride (2-Benzofuran-1,3-dione) modifier content on the structure changing, adhesive and physical/mechanical properties of the composite material has been studied. The modifier was introduced into the epoxy oligomer DER-331 at the content of $q = 0.10...3.0$ wt%. The cold-curing hardener triethylenetetramine TETA was used for the epoxy composition crosslinking. The polymerization temperature was $T = 393 \pm 2$ K. Based on the results of experimental studies, the optimal content of the modifier 2-Benzofuran-1,3-dione in the epoxy matrix with improved adhesive properties has been determined. It was $q = 0.10$ wt% per 100 wt% of oligomer DER-331. The adhesion strength at separation was $\sigma_a = 40.0$ MPa, and residual stresses were $\sigma_{res} = 1.1$ MPa. The increase in adhesion properties was associated with the activation of segments of epoxy oligomer macromolecules for interaction with $C=O$ groups of the modifier, which at the initial stage during physicochemical crosslinking ensures the orderliness of the polymer structure. The influence of the modifier content on the values of fracture stresses during the flexion (σ_{fl}), flexural modulus (E) and impact strength (W) has been investigated. It has been shown, that the values of fracture stresses significantly depend on the

modifier content in the epoxy binder. The introduction of a small amount of the modifier of $q = 0.10...0.5$ wt% in epoxy binder provides the formation of polymeric materials with the following properties: fracture stresses were $\sigma_{fl} = 92.8$ MPa, flexural modulus was $E = 3.35$ GPa, impact strength was $W = 17.5$ kJ/m². The increase in mechanical strength is due to the partial plasticizing action of the modifier, which provides increased mobility and deformation of the macro chains of the epoxy oligomer and allows to evenly distribute the impact load over the volume of the polymer.

Keywords: epoxy matrix, modifier, hardener, adhesion, physical and mechanical properties, flexural modulus, impact strength.

© Сапронов О. О., Соценко В. В., Сапронова А. В., Воробйов П. О., Яцюк В. М.

Статтю прийнято
до редакції 11.05.21

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ З УРАХУВАННЯМ ПИТОМОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОВІДНОСТІ ЛИТОЇ ШТАМПОВОЇ СТАЛІ 4X4H5M4Ф2

Сидорчук О. М., к.т.н., старший дослідник Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, м. Київ, e-mail: sedoroleg@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0026-7525

Наведені результати досліджень визначення структурно-чутливої величини (провідності) після термічної обробки (гартування та відпуску) сталі (без деформації-кування) з регулюванням аустенітного перетворення при експлуатації марки 4X4H5M4Ф2. Встановлено, що при оптимізованих режимах термічної обробки дослідженої сталі визначалось за мінімальним значенням параметра – питомої електричної провідності. Так для оптимального значення за температурою гартування сталі (1100 °С) питома електрична провідність становила 0,075 Ом·мм²/м, а при відпуску (595 °С) – 0,0415 Ом·мм²/м. Установлено зв'язок між питомою електричною провідністю та параметром кристалічної чарунки мартенситу, твердості та ударної в'язкості гартованої сталі. Установлено, що в процесі первинної рекристалізації за температури вище 1110 °С, провідність сталі зменшується. Встановлено, що при повторному нагріві (відпуску), провідність сталі збільшується, а також інтенсивно змінюється структурно-чутлива механічна характеристика (ударна в'язкість), яка підвищується у два рази в інтервалі температур відпускнуї крихкості 475±15 °С. Оскільки за такого інтервалу температур відбувається аномальне зниження до 15 Дж/см² та збільшується параметр кристалічної чарунки мартенситу (2,8847·10⁻¹ мкм). Оптимізований режим гартування 1100 °С та відпуску 590 °С дослідженої сталі сприяв підвищенню ударної в'язкості до 30 Дж/см² та збільшенням провідності в інтервалі температур відпускнуї крихкості. Це дає можливість підвищити ресурс експлуатації пресового інструменту є (фільтери) зі сталі 4X4H5M4Ф2 для гарячого деформування алюмінієвого сплаву в інтервалі робочих температур 450-500 °С.

Ключові слова: штампова сталь, склад, термічна обробка, механічні властивості.

DOI: 10.33815/2313-4763.2021.1.24.129–135

Методи дослідження. Хімічний склад сталі відповідав маркуванню 4X4H5M4Ф2: 0,40 – 0,42 % С; 3,80 – 3,90 % Cr; 5,00 – 5,10 % Ni; 3,70 – 3,80 % Mo; 1,70 – 1,80 % V; 0,014 – 0,016 % Al; 0,040 – 0,043 % W; 0,010 – 0,013 % Co; 0,018 – 0,020 % Nb; 0,065 – 0,067 % Cu; 0,002 – 0,003 % Ca; 0,003 – 0,005 % N; 0,072 – 0,075 % Si; 0,23 – 0,24 % Mn; 0,004 – 0,005 % S; 0,003 – 0,004 % P. Випробування на твердість проводили на твердомірі HR150A. Поріг міцності та межу плинності визначали за стандартною методикою випробування на розтяг за ГОСТом 1497-84 на універсальній установці GNT50. Ударну в'язкість визначали на випробувальній машині NI300 на зразках розмірами 10x10x55 мм без надрізу. Питомий електричний опір вимірювали на поверхні зразка (висота зразка становила 5 мм, відстань між електродами вимірювання становила 5 мм) за допомогою двоканального цифрового електричного вимірювального чотиризондового тестера ST2263. Для отримання дифракційних картин використовували модернізований рентгенівський дифрактометр ДРОН-3, оснащений комп'ютерною системою запису дифрактограм і рентгенівською трубкою з мідним анодом.

Викладення основного матеріалу. Авторками (Касілова А. Н. та Касілова О. А.) було показано [1], залежність між фізичними структурно-чутливими властивостями (коерцитивної сили, питомої електричної провідності, намагнічення насиченості та твердості) легованих сталей, що залежало від складу та режиму термічної обробки. Такий методичний підхід при визначенні одною з величин (наприклад, питомою електричною провідністю) дає можливість проводити оптимізацію термічної обробки. В роботах [2–6] було визначено оптимальний режим гартування литої сталі 4X4H5M4Ф2 (1100±5 °С), що дозволило підвищити теплостійкість сталі до температури 650 °С при 40 HRC за кімнатної температури. Мета роботи полягає в тому, щоб установити залежність між структурно-чутливою фізичною властивістю (питома електрична провідність) та механічними

властивостями сталі з урахуванням оптимізації режимів термічної обробки. Досліджена сталь 4X4H5M4Ф2 відноситься до сталі з регулюванням аустенітного перетворення при експлуатації (РАПЕ). Сталь РАПЕ, відрізняється від штампової сталі феритного класу, тим, що після гартування має мартенситну структуру, але при роботі штампового інструмента за робочих температур (вище критичної точки A_3) працює в аустенітній області [7–13]. Механізм РАПЕ сталі забезпечується легуванням нікелем, котрий розчиняється в залізі та розширює температурний інтервал існування γ -Fe модифікації. Це дає змогу зберігати аустенітну структуру впродовж усього періоду високотемпературної експлуатації штампового інструмента. В роботах [14, 15] показана можливість використання штампової сталі з РАПЕ (4X3H5M3Ф) для гарячого деформування мідно-нікелевого сплаву МНЖ 5-1 за температур експлуатації (900–950 °С) з підвищеним ресурсом експлуатації порівнюючи зі сталлю 3X3M3Ф. У роботі запропоновано покращений склад сталі з РАПЕ (4X4H5M4Ф2) для виготовлення штампового інструмента для гарячого деформування міді, мідних та алюмінієвих сплавів при експлуатації нижче критичної точки A_1 дослідженої сталі.

Раніше було встановлено оптимальні температури гартування (1100 ± 5 °С) та відпуску (600 ± 5 °С) сталі 4X4H5M4Ф2 [3], цим режимам відповідали підвищені міцність та теплостійкість порівняно зі стандартними сталями феритного класу 4X5MФ1С та 3X3M3Ф у вигляді сортового прокату. Результати досліджень при визначенні питомої електричної провідності в залежності від температури гартування від 1040 до 1140 °С та відпуску від 560 до 660 °С дослідженої сталі представлено на рис. 1. Установлено, що при оптимальних режимах термічної обробки дослідженої сталі відповідає мінімальне значення питомої електричної провідності при гартуванні за температури 1100 °С – $0,075 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ (лінія 1, рис. 1) та відпуску 595 °С – $0,0415 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ (лінія 2, рис. 1). Максимальне значення питомої електричної провідності ($0,138 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$) дослідженої сталі відповідає температурі гартування 1060 ± 5 °С (лінія 1, рис. 1). Установлено, що за температури гартування литої сталі 1060 ± 5 °С та відпуску 600 ± 5 °С, механічні властивості занижені (зниження твердості на 5–9 HRC, порогу міцності на 210–280 МПа та межа плинності 210–220 МПа), порівнюючи за температури гартування 1100 ± 5 °С (твердість 49 HRC, поріг міцності 1600 МПа та межа плинності 1500 МПа) (таблиця). Отже, підвищення механічних властивостей термічно-зміцненої сталі залежить від мінімального значення питомої електричної провідності (підвищення провідності). Встановлено, що за температури гартування вище 1110 °С дослідженої сталі, відбувається процес первинної рекристалізації та зменшується її провідність (підвищується питома електрична провідність від $0,095$ до $0,140 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ (лінія 1, рис. 1).

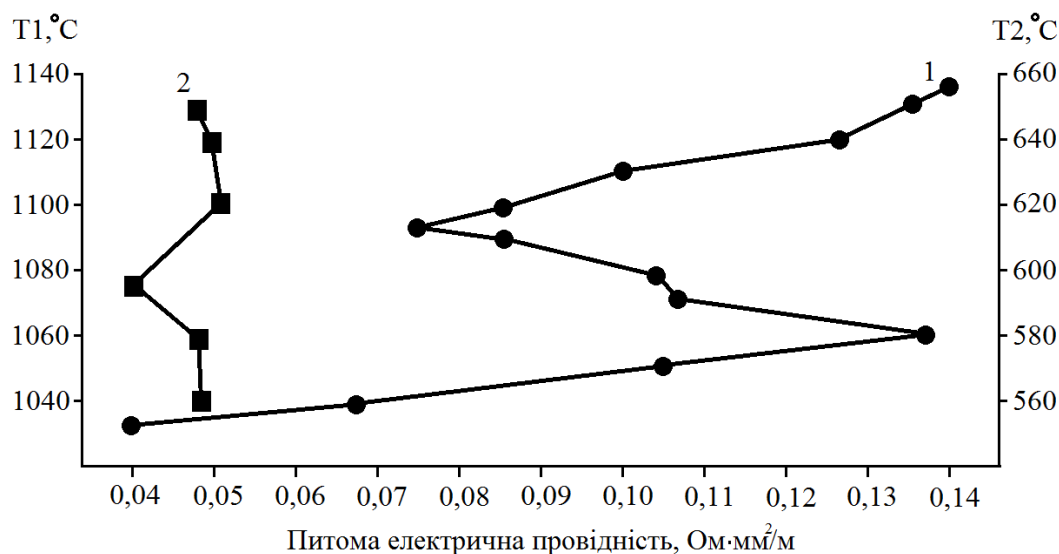


Рисунок 1 – Залежність питомої електричної провідності (за кімнатної температури) від режимів термічної обробки сталі 4X4H5M4Ф2: 1 – гартування за температур T1, 2 – відпуск за температур T2

Таблиця – Фізико-механічні властивості штампової сталі 4X4H5M4Ф2 після гартування та відпуску 600 °С

Властивості	Температура гартування		
	1065±5 °С *	1065±5 °С **	1100±5 °С * [3]
Поріг міцності, МПа	1390	1320	1600
Межа плинності, МПа	1280	1290	1500
Твердість, HRC	40	44	49

* – гартування (одноразове), ** – гартування (подвійне)

У роботі встановлено, що відпускна крихкість дослідженої сталі (4X4H5M4Ф2) за температури 475±15 °С пов'язана з максимальним значенням параметра «а» кристалічної структури (кристалічної чарунки мартенситу – $2,8847 \cdot 10^{-1} \text{ nm}$) при формуванні твердого розчину заміщення на основі системи «Fe-C» (лінія 3, рис. 2). Встановлення зв'язку між особливостями кристалічної структури дослідженої сталі та комплексу фізико-механічних властивостей показало інтенсивне зміння параметра фізичної структурно-чутливої величини (підвищення питомої електричної провідності до 0,200 Ом·мм²/м (лінія 1, рис. 2), де підвищується крихкість за температур 460–490 °С при аномальному зниженні ударної в'язкості до 15 Дж/см² (лінія 1, рис. 3) та підвищується твердість до 56,5 HRC (лінія 2, рис. 3). Поясненням цього є підвищення теплостійкості сталі в температурному інтервалі відпуску 450–500 °С, що пов'язано зі збереженням кількості низькотемпературних карбідних фаз та збільшенням кількості високотемпературних карбідних фаз з підвищеною твердістю. Максимальне значення параметра кристалічної чарунки мартенситу досягається за температури відпуску 475 °С. Такі високі значення можна пояснити формуванням твердого розчину заміщення.

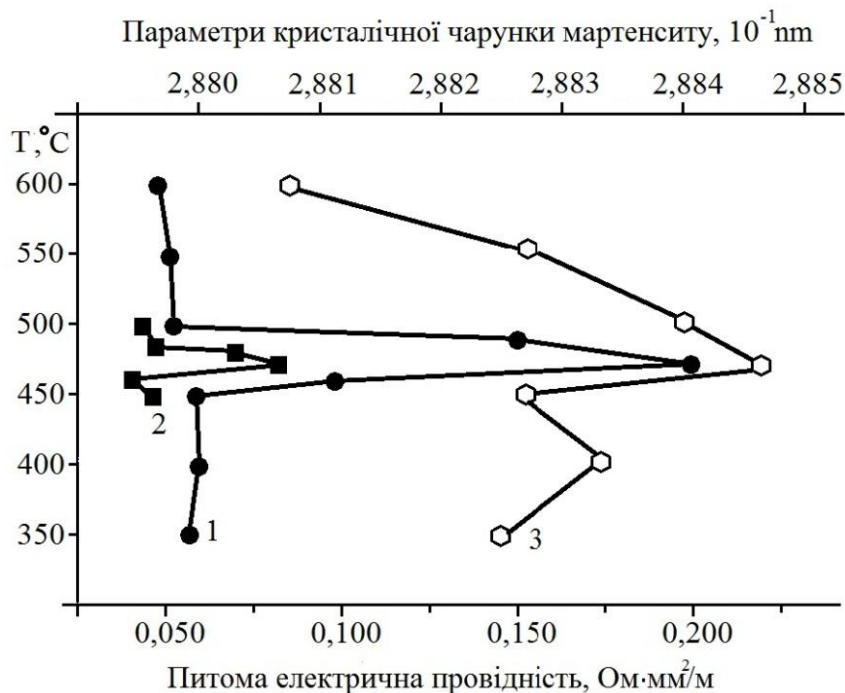


Рисунок 2 – Залежність параметрів (за кімнатної температури) від режимів термічної обробки сталі 4X4H5M4Ф2:

1 – питома електрична провідність (гартування за температури 1100±5 °С та відпуск за температур T), 2 – питома електрична провідність (гартування за температури 1100±5 °С, відпуск за температури 590±5 °С та наступний нагрів за температур T), 3 – параметри кристалічної чарунки мартенситу (гартування за температури 1100±5 °С та відпуск за температур T)

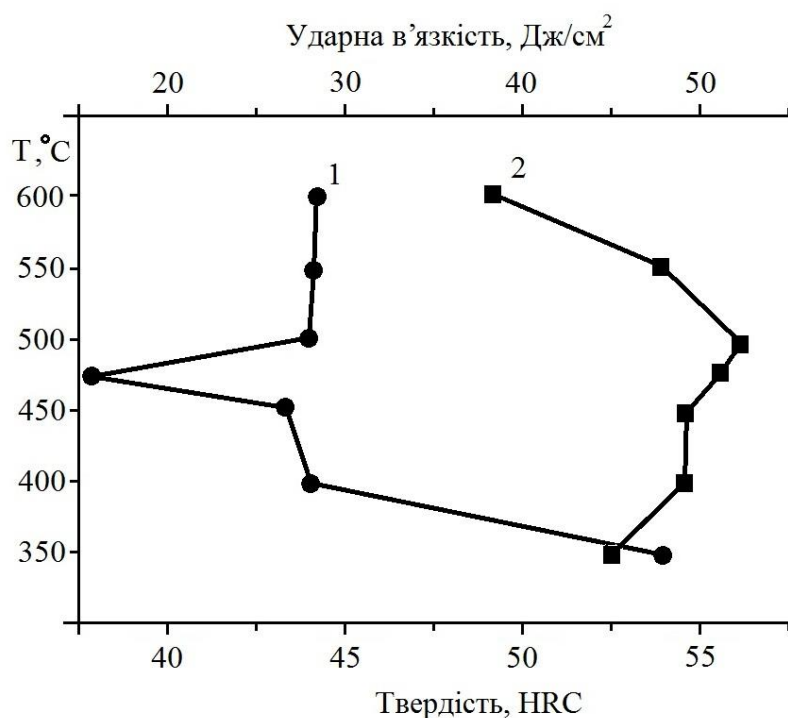


Рисунок 3 – Залежність параметрів (за кімнатної температури) від температури відпуску за температур (Т) гартованої (1100 ± 5 °C) сталі 4X4H5M4Ф2: 1 – ударна в'язкість, 2 – твердість

Установлено, що при застосуванні оптимізованих режимів гартування та відпуску (1100 °C, 595 °C, відповідно) дослідженої сталі, це сприяє підвищенню ударної в'язкості до 30 Дж/см² в інтервалі температур 460 – 490 °C відпускнуї крихкості [4] та зменшенню питомої електричної провідності до $0,080$ Ом·мм²/м (лінія 2, рис. 2). Підвищуючи механічну характеристику (ударну в'язкість) сталі 4X4H5M4Ф2, це дає можливість при ударних циклічних навантаженнях, підвищити ресурс експлуатації пресового інструмента (матриці-фільери) для гарячого пресування алюмінієвого сплаву (наприклад, АК7ч) в інтервалі температур відпускнуї крихкості 450 – 500 °C [4, 5].

Висновок. Отже, при проведенні оптимізації режимів термічної обробки можна враховувати змінення параметра фізичної структурно-чутливої величини (питомої електричної провідності) для підвищення основних механічних властивостей сталі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Касилов А. Н., Касилов О. А. Зависимость физических структурно-чувствительных свойств и твердости легированных сталей от состава и режима термической обработки. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*, 2013. № 2 (9). С. 171–182.
2. Штампова сталь : пат. 141447 Україна : МПК С22С 38/00. № u 2019 09670 ; заявл. 05.09.2019 ; опубл. 10.04.2020. Бюл. № 7.
3. Сидорчук О. М., Миронюк Д. В., Радченко О. К., Гогаєв К. О., Хонгтуанг Є. Підвищення теплостійкості та властивостей штампової сталі з регулюванням аустенітного перетворення при експлуатації. *Металознавство та обробка металів*. 2019. № 2. С. 19–25. <https://doi.org/10.15407/mom2019.02.019>.
4. Сидорчук О. М., Гогаєв К. О., Радченко О. К., Миронюк Д. В., Миронюк Л. А. Термічна обробка штампової сталі підвищеної стійкості. *Металознавство та обробка металів*. 2020. № 2. С. 29–37. <https://doi.org/10.15407/mom2020.02.003>.
5. Сидорчук О. М. Властивості штампової сталі 4X4H5M4Ф2 для гарячого деформування кольорових металів та сплавів. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2021. № 1. С. 108–112. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-154-1-108-112>.

6. Сидорчук О. М. Вплив термічної обробки на штампову сталь 4X4N5M4F2 та встановлення її фізико-механічних властивостей. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2021. № 1 (7). С. 34–38. <https://doi:10.20998/2413-4295.2021.01.05>.
7. Озерский А. Д., Кругляков А. А., Данил А. Н. О выборе стали для матриц горячего прессования медных сплавов. *Цветные металлы*. 1981. № 8. С. 83–84.
8. Озерский А. Д., Кругляков А. А. Упрочнение стали ЭП930 для матриц горячего прессования медных сплавов. *Цветные металлы*. 1984. № 10. С. 76–78.
9. Озерский А. Д., Кругляков А. А. Штамповые стали с регулируемым аустенитным превращением при эксплуатации. Ленинград : ЛДНТП, 1988. 26 с.
10. Позняк Л. А. Инструментальные стали. Киев : Наук. думка, 1996. 488 с.
11. Лебедева Н. В. Современные штамповые стали для горячего деформирования. *Балтийские металлы*. 2003. № 1. С. 7–9.
12. Лебедева Н. В. Повышение стойкости инструмента для прессования труднодеформируемых цветных сплавов из сталей с регулируемым аустенитным превращением при эксплуатации : автореф. дис ... канд. техн. Наук : 05.02.01. Санкт-Петербург, 2005. 18 с.
13. Перепьолкіна М. Н., Грабовський В. Я. Вибір ефективного легування нових штампових сталей з аустенітним перетворенням при експлуатації. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2016. № 1. С. 11–15.
14. Гогаєв К. О., Радченко О. К., Сидорчук О. М., Лук'янчук В. В. Технологія виготовлення штампової сталі 40X3N5M3Ф для гарячого деформування. *Цільова комплексна програма НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин»*. Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, 2015. С. 669–672.
15. Гогаєв К. О., Сидорчук О. М., Радченко О. К., Лук'янчук В. В., Орел Г. Г. Дослідження режимів термічної обробки штампової сталі 4X3N5M3Ф. *Современные проблемы физического материаловедения. Труды Института проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины. Серия «Физико-химические основы технологии порошковых материалов»*. Киев, 2016. Выпуск 25. С. 105–108.

REFERENCES

1. Kasilov A. N., Kasilov O. A. (2013). Zavisimostj fizicheskikh strukturno-chuvstvitel'nykh svoystv i tvyordosti legirovanih staley ot sostava i rezhima termicheskoy obrabotki. *Naukoviyj visnik Khersons'jkoj derzhavnoj mors'jkoj akademii*, 2 (9), 171–182.
2. *Shtampova stalj* : pat. 141447 Ukraïna : MPK S22S 38/00. № u 2019 09670 ; zayavl. 05.09.2019 ; opubl. 10.04.2020. Byul. № 7.
3. Sidorchuk O. M., Mironyuk D. V., Radchenko O. K., Gogaev K. O. & Khongguang E. (2019). Pidvithennya teplostiykosti ta vlastivostey shtampovoi stali z reguluyvannyam austenitnogo peretvorennya pri ekspluatacii. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*, 2, 19–25. Doi: 10.15407/mom2019.02.019.
4. Sidorchuk O. M., Gogaev K. O., Radchenko O. K., Mironyuk D. V. & Mironyuk L. A. (2020). Termichna obrobka shtampovoi stali pidvithenoï stiykosti. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*, 2, 29–37. DOI: 10.15407/mom2020.02.003.
5. Sydorchuk O. M. (2021). Vlastyivosti shtampovoyi stali 4X4N5M4F2 dlya garyachogo deformuvannya kolorovykh metaliv ta splaviv. *Visnyk Vinnyczkogo politexnichnogo instytutu*, 1, 108–112. DOI: 10.31649/1997-9266-2021-154-1-108-112.
6. Sydorchuk O. M. (2021). Vplyv termichnoyi obrobky na shtampovu stal 4X4N5M4F2 ta vstanovlennya yiyi fizyko-mexanichnykh vlastyvostej. *Visnyk NTU «XPI»*, 1 (7), 34–38. DOI: 10.20998/2413-4295.2021.01.05.
7. Ozerskiy A. D., Kruglyakov A. A., Danil A. N. (1981). O vihbore stali dlya matric goryachego pressovaniya mednikh splavov. *Cvetnihe metallih*, 8, 83–84.

8. Ozerskiy A. D., Kruglyakov A. A. (1984). Uprochnenie stali EhP930 dlya matric goryachego pressovaniya mednikh splavov. *Cvetnihe metallih*, 10, 76–78.
9. Ozerskiy A. D., Kruglyakov A. A. (1988). *Shtampovihe stali s reguliruemihm austenitnihm prevratheniem pri ehkspluatacii*. Leningrad : LDNTP.
10. Poznyak L. A. (1996). *Instrumentaljnihe stali*. Kiev : Nauk. dumka.
11. Lebedeva N. V. (2003). Sovremennihe shtampovihe stali dlya goryachego deformirovaniya. *Baltiyskie metallih*, 1, 7–9.
12. Lebedeva N. V. (2005). Povihshenie stoykosti instrumenta dlya pressovaniya trudnodeformiruemihkh cvetnikh splavov iz stalej s reguliruemihm austenitnihm prevratheniem pri ehkspluatacii : extended abstract of candidate's thesis. Sankt Peterburg.
13. Perepolkyna M. N., Grabovskiy V. Ya. (2016). Vybir efektyvnogo leguvannya novyx shtampovykh stalej z austenitny`m peretvorennyam pry ehkspluatacii. *Novi materialy i tekhnologiyi v metalurgiyi ta mashynobuduvanni*, 1, 11–15.
14. Gogayev K. O., Radchenko O. K., Sydorhuk O. M. & Lukyanchuk V. V. (2015). Tekhnologiya vy`gotovlennya shtampovoyi stali 40X3N5M3F dlya garyachogo deformuvannya. *Cilova kompleksna programa NAN Ukrayiny «Problemy resursu i bezpeky ehkspluataciiy konstrukcij, sporud ta mashyn»*. Instytut elektrozvaryuvannya im. Ye. O. Patona NAN Ukrayiny, 669–672.
15. Gogayev K. O., Sydorhuk O. M., Radchenko O. K., Lukyanchuk V. V. & Orel G. G. (2016). Doslidzhennya rezhymiv termichnoyi obrobky` shtampovoyi stali 4X3N5M3F. *Sovremennyye problemi fizycheskogo materialovedeniya. Sovremennihe problemih fizycheskogo materialovedeniya. Trudih instituta problem materialovedeniya im. I. N. Francevicha NAN Ukrainih. Seriya «Fiziko-khimicheskie osnovih tekhnologi poroshkovihkh materialov»*. Kiev, 25, 105–108.

Сидорчук О. М. ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ТЕРМООБРАБОТКИ С УЧЕТОМ УДЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ЛИТОЙ ШТАМПОВОЙ СТАЛИ 4X4N5M4F2

Приведены результаты исследований по определению структурно-чувствительной величины (электропроводности) после термической обработки (закалки и отпуска) стали (без деформационно-ковки) с регулированием аустенитного превращения в процессе эксплуатации марки 4X4N5M4F2. Установлено, что при оптимизированных режимах термической обработки исследуемой стали определялось минимальное значение параметра – удельной электропроводности. Так, при оптимальном значении температуры отпуска стали (1100 °C) удельная электропроводность составила 0,075 Ом·мм²/м, а при отпуске (595 °C) – 0,0415 Ом·мм²/м. Связь между удельной электропроводностью и параметром кристаллической ячейки мартенсита, твердостью и ударной вязкостью закаленной стали. Установлено, что в процессе первичной рекристаллизации при температурах выше 1110 °C электропроводность стали снижается. Установлено, что при повторном нагреве (отпуске) в стали увеличивается проводимость и интенсивно изменяется структурно-чувствительная механическая характеристика (ударная вязкость), которая увеличивается вдвое в диапазоне температур отпускной хрупкости 475 ± 15 °C. Поскольку его аномалия возникает в таком температурном диапазоне, уменьшение составляет до 15 Дж/см², а параметр кристаллической ячейки мартенсита увеличивается (2,8847·10⁻¹ нм). Оптимизированный режим закалки 1095 °C и отпуска 590 °C исследуемой стали позволил повысить ударную вязкость до 30 Дж/см² и повысить проводимость в диапазоне температур отпускной хрупкости первого рода. Это позволяет увеличить срок службы пресс-инструмента (штампа) из стали 4X4N5M4F2 для горячей деформации алюминиевого сплава в интервале температур 450–500 °C.

Ключевые слова: штамповая сталь, состав, термообработка, механические свойства.

Sydorchuk O. M. OPTIMIZING HEAT TREATMENT MODES WITH ALLOWANCE FOR SPECIFIC ELECTRIC CONDUCTIVITY OF CAST DIE STEEL 4KH4N5M4F2

The results of research on determination of structurally sensitive value (conductivity) after heat treatment (hardening and tempering) of steel (without deformation-forging) with adjustment of austenitic transformation during operation of the brand 4Kh4N5M4F2 have been disclosed. It has been established that the minimum value of the parameter – specific electric conductivity was being determined at optimized

modes of heat treatment of the investigated steel. Thus, for the optimal value of the tempering temperature of steel (1100 °C), the specific electric conductivity was 0,075 Ohm·mm²/m, and at tempering (595 °C) – 0,0415 Ohm·mm²/m. The relationship between the specific electric conductivity and the parameter of the crystal cell of martensite, hardness and toughness of hardened steel. It has been established that in the process of primary recrystallization at temperatures above 1110 °C, the conductivity of steel decreases. It has been proved that during reheating (tempering), the conductivity in steel increases, and the structurally sensitive mechanical characteristic (impact strength) changes intensively, which increases twice in the range of tempering brittleness temperatures of 475±15 °C. Since its anomaly occurs at that kind of temperature range, the decrease is up to 15 J/cm² and the parameter of the crystalline cell of martensite increases (2.8847·10⁻¹ nm). The optimized mode of hardening of 1095 °C and tempering of 590 °C of the investigated steel, enabled to increase impact strength to 30 J/cm² and increased conductivity in the range of temperatures of tempering brittleness of the first kind. This makes it possible to increase the service life of the press tool (die) made of steel 4Kh4N5M4F2 for hot deformation of aluminum alloy in the temperature range of 450-500 °C.

Keywords: die steel, composition, heat treatment, mechanical properties

© Сидорчук О. М.

Статтю прийнято
до редакції 07.06.21

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 цієї проблеми, на які посилається автор; виділення не вирішених 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 цього дослідження та перспективи подальших наукових досліджень у цьому 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, учене 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. Усі 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); вирішення 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 наведених вище найменувань.

Список використаної літератури подається загальним списком у кінці рукопису (послідовність – у порядку згадування по тексту) згідно зі встановленими вимогами стандарту ДСТУ ГОСТ 7.1:2006. У списку повинно бути не менше 10 джерел, у списку посилань неприпустимо використання ГОСТів та загальнонаціональних стандартів, відсоткове співвідношення самоцитування – не більше 30 % (тобто, якщо Ви використали 10 посилань, з них може бути не більше 3 на роботи автора).

До статті також наводиться перелік літератури латиницею (*References*), для його оформлення використовувати APA-стиль. Список літератури транслітерується або перекладається англійською мовою. Транслітерувати інформацію необхідно відповідно до постанови Кабінету Міністрів України від 27.01.2010 «Про впорядкування транслітерації українського алфавіту латиницею» (транслітерацію української мови можна здійснити за посиланням <http://translit.kh.ua> [обрати стандарт: Паспортний (КМУ 2010)]). Транслітерувати джерела, які пишуться латиницею не потрібно.

Структуровані анотації українською, російською та англійською мовами обсягом від 1800 знаків без пропусків надаються: мовою оригіналу статті перед вступом, на двома іншими мовами – після тексту статті. У кінці анотації 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, учене 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 напрямкам журналу. Рукописи авторам не повертаються.

ЗМІСТ

МОРСЬКИЙ ТА РІЧКОВИЙ ТРАНСПОРТ

Білій В. А., Голіков В. А. АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ ЯКІСТЮ ТА КОМФОРТНІСТЮ ПОВІТРЯ СУДНОВИХ ПРИМІЩЕНЬ	6
<i>Годованюк С. П., Селіванов С. Є.</i> ПІДХОДИ ДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТІЙКОГО УПРАВЛІННЯ СИСТЕМОЮ ПОШУКУ І РЯТУВАННЯ НА МОРІ ПОЗАШТАТНИХ СИТУАЦІЯХ	19
Zinchenko S. M., Nosov P. S., Popovych I. S. CONTROL REDUNDANCY AS A QUANTITATIVE MEASURE OF MANEUVERABILITY	29
Мальцев А. С. НАВИГАЦИОННАЯ СИСТЕМА ГАРАНТИРОВАННОГО БЕЗОПАСНОГО УПРАВЛЕНИЯ МАНЕВРИРОВАНИЕМ СУДОВ БЕЗ ЭКИПАЖА	38
Nosov P. S., Zinchenko S. M., Prokorchuk Yu. A., Popovych I. S., Litovchenko V. I. INFLUENCE HUMAN FACTOR ON SAFETY'S PLANNING ROUTE OF WATER TRANSPORT	57

ІНЖЕНЕРІЯ У ТРАНСПОРТНІЙ ГАЛУЗІ

Безбах О. М. ВИКОРИСТАННЯ ІННОВАЦІЙНИХ ПОЛІМЕРКОМПОЗИТНИХ ПОКРИТТІВ З МЕТОЮ ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ СУДНОВОДІННЯ	72
Житник Д. В., Гусєв В. М., Букетов А. В., Кулініч В. Г., Яцюк В. М. ВПЛИВ МАЛЕЙНОВОГО АНГІДРИДУ НА АДГЕЗІЙНІ ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕПОКСИДНОЇ МАТРИЦІ ДЛЯ ЗАХИСТУ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ	82
Ляшук О. Л., Гевко І. Б., Левкович М. Г., Вовк Ю. Я., Сташків М. Я., Капський Д. В. ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ДНА КУЗОВА НАПІВПРИЧЕПА ВАНТАЖНОГО АВТОМОБІЛЯ	93

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

- Наговський Д. А., Дощенко Г. Г.** **106**
УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМУ ЗМАЩЕННЯ ГОЛОВНОГО
ДВИГУНА СУДНА

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

- Сапронов О. О., Соценко В. В., Сапронова А. В., Воробйов П. О.,
Яцюк В. М.** **118**
ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВМІСТУ МОДИФІКАТОРА
2-БЕНЗОФУРАН-1,3-ДИОН НА АДГЕЗІЙНІ ТА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ
ВЛАСТИВОСТІ ЕПОКСИДНИХ КОМПОЗИТІВ

- Сидорчук О. М.** **129**
ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ
З УРАХУВАННЯМ ПИТОМОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОВІДНОСТІ
ЛИТОЇ ШТАМПОВОЇ СТАЛІ 4Х4Н5М4Ф2

- ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ** **136**

CONTENTS

SEA AND RIVER TRANSPORT

- Bily V. A., Golikov V. A.** 6
AUTOMATIC CONTROL OF INDOOR AIR QUALITY AND COMFORT OF SHIP PREMISES
- Godovanyuk S. P., Selivanov S. E.** 19
APPROACHES TO ENSURING STABLE CONTROL OF THE SEARCH AND RESCUE SYSTEM AT SEA IN NON-STANDARD SITUATIONS
- Zinchenko S. M., Nosov P. S., Popovych I. S.** 29
CONTROL REDUNDANCY AS A QUANTITATIVE MEASURE OF MANEUVERABILITY
- Maltsev A. S.** 38
NAVIGATION SYSTEM FOR GUARANTEED SAFE MANEUVERING CONTROL OF SHIPS WITHOUT A CREW
- Nosov P. S., Zinchenko S. M., Prokopchuk Yu. A., Popovych I. S., Litovchenko V. I.** 57
INFLUENCE HUMAN FACTOR ON SAFETY'S PLANNING ROUTE OF WATER TRANSPORT

ENGINEERING IN TRANSPORT INDUSTRY

- Bezbakh O. M.** 72
THE USE OF INNOVATIVE POLYMER COMPOSITE COATINGS TO IMPROVE THE PERFORMANCE OF TECHNICAL MEANS OF NAVIGATION
- Zhitnik D. V., Gusev V. N., Buketov A. V., Kulinich V. G., Yatsyuk V. N.** 82
INFLUENCE OF MALEIC ANHYDRIDE ON ADHESION AND MECHANICAL PROPERTIES OF EPOXY MATRIX FOR PROTECTION OF VEHICLE PARTS
- Lyashuk O. L., Hevko I. B., Levkovych M. G., Vovk Y. Y., Stashkiv M. Ya., Kapsky D. V.** 93
INVESTIGATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE BOTTOM OF THE BODY OF A TRUCK SEMI-TRAILER

AUTOMATION AND COMPUTER INTEGRATED TECHNOLOGIES

- Nagovsky D. A., Doshchenko G. G.** 106
IMPROVEMENT OF ALGORITHM OF GREASING OF THE MAIN ENGINE OF THE VESSEL

MATERIALS SCIENCE

Sapronov O. O., Sotsenko V. V., Sapronova A. V., Vorobiov P. O., Yatsyuk V. M.	118
INVESTIGATION OF THE EFFECT OF MODIFIER 2-BENZOFURAN-1,3- DIONE ON ADHESION AND PHYSICAL/MECHANICAL PROPERTIES OF EPOXY COMPOSITES	
Sydorchuk O. M.	129
OPTIMIZATION OF HEAT TREATMENT MODES TAKING INTO ACCOUNT THE SPECIFIC ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF CAST DIE STEEL 4KH4N5M4F2	
APPLICATION REQUIREMENTS	136

ДЛЯ ПОДАТОК

Науковий журнал

НАУКОВИЙ ВІСНИК
ХЕРСОНСЬКОЇ ДЕРЖАВНОЇ МОРСЬКОЇ АКАДЕМІЇ

№ 1 (24), 2021

Відповідальний за випуск *Р. Є. Врублевський*
Технічний редактор *О. Ю. Клементьєва*
Комп'ютерна верстка *О. В. Філіппова*
Коректор *Н. М. Грем*
Коректура англійської мови *А. С. Волкова*
Друк, фальцювальню-палітурні роботи *В. Г. Удов*

Підписано до друку 07.09.2021. Формат 84×108/32.
Папір офсетний.
Ум. др. арк. 9,00. Наклад 100 прим.

Видавець і виготовлювач ХДМА
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 4319 від 10.05.2012
73000, м. Херсон, просп. Ушакова, 20