

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ОДЕСЬКИЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ

Науковий журнал

ВИПУСК 1(20), 2024

Заснований у жовтні 2016 року



Видавничий дім
«Гельветика»
2024

**ОДЕСЬКИЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ
РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ
НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ**

**№ 1(20)
2024**

Заснований у жовтні 2016 року

Виходить 4 рази на рік

Реєстрація суб'єкта у сфері друкованих медіа:
Рішення Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення
№ 1547 від 09.05.2024 року

На підставі Наказу Міністерства освіти і науки України № 1188 від 24.09.2020 р.
(додаток 5) журнал внесений до Переліку наукових фахових видань України (категорія «Б»)
у галузі економічних та технічних наук (051 – Економіка, 073 – Менеджмент,
133 – Галузеве машинобудування, 271 – Морський та внутрішній водний транспорт,
275 – Транспортні технології (за видами)).

Засновник:

Одеський національний морський університет
Україна, 65029, м. Одеса, вул. Мечникова, 34

Редакційна колегія:

Головний редактор – д.т.н., проф. *Руденко С.В.*
Заступник головного редактора – д.е.н., проф. *Савельєва І.В.*
Відповідальний секретар – д.т.н., доц. *Мінчев Д.С.*

Члени редакційної колегії:

Варбанець Р.А., д.т.н., проф., ОНМУ;
Дубровський М.П., д.т.н., проф., ОНМУ;
Єгутов К.В., д.т.н., проф., ОНМУ;
Постан М.Я., д.е.н., проф., ОНМУ;
Кириллова О.В., д.т.н., проф., ОНМУ;
Ланкіна І.О., д.е.н., проф., ОНМУ;
Пітерська В.М., д.т.н., проф., ОНМУ;
Малаксіано М.О., д.т.н., проф., ОНМУ;
Немчук О.О., к.т.н., доц., ОНМУ;
Мельников С.В., к.е.н., доц., ОНМУ;
Філіна-Давидович Л.С., д.т.н., Західноморський технологічний університет, Щецин, Польща;
Аймелек Мурат, PhD, Ізмірський університет імені Катіна Челебі, Туреччина;
Малекі Вішкіаї Бехзад, PhD, Вільний міжнародний університет соціальних досліджень імені Гвідо Карлі, Італія;
Колмикова Анна, DSc, Бременський університет, Німеччина;
Любомиров Славі Ясенов, PhD, Пловдивський університет імені Паїсія Глендарського, Болгарія;

Духовник Йосе, DSc, Люблянський університет, Словенія;
Гасанов В., д.т.н., проф., Азербайджанська державна морська академія, Азербайджан;
Садигов В., к.т.н., доц., Азербайджанська державна морська академія, Азербайджан;
Дашковський Сергій, DSc, Вюрцбурзький університет імені Юліуса та Максиміліана, Німеччина;
Клюс Олег, DSc, Морська Академія в Щецині, Польща;
Цисар Чаба, PhD, Будапештський університет технології та економіки, Угорщина;
Нзок Ан Міл, PhD, Технологічний університет Кочі, Японія;
Медведев Олександр, DSc, Інститут транспорту та зв'язку, Латвія;
Попова Олена, DSc, Інститут транспорту та зв'язку, Латвія;
Мезітіс Марекс, DSc, Транспортна академія, Латвія;
Нам Кю Парк, PhD, Університет ТонгМьонг, Південна Корея.

Рекомендовано до друку Вченою радою
Одеського національного морського університету
(протокол № 10 від 20.05.2024 р.)

Відповідальність за достовірність фактів, цитат, власних імен, географічних назв,
назв підприємств, організацій, установ та іншої інформації несуть автори статей.

Висловлені у цих статтях думки можуть не збігатися
з точкою зору редакційної колегії, не покладають на неї ніяких зобов'язань.
Передруки і переклади дозволяються лише за згодою автора та редакції.

Статті у виданні перевірені на наявність плагіату за допомогою
програмного забезпечення StrikePlagiarism.com від польської компанії Plagiat.pl.

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE

ODESSA
NATIONAL MARITIME UNIVERSITY

TRANSPORT DEVELOPMENT

Scientific journal

ISSUE 1(20), 2024

Founded in October 2016



Publishing House
"Helvetica"
2024

ODESSA
NATIONAL MARITIME UNIVERSITY
TRANSPORT DEVELOPMENT
SCIENTIFIC JOURNAL

№ 1(20)
2024

Founded in October 2016

Frequency: four times a year

Registration of Print media entity:
Decision of the National Council of Television and Radio Broadcasting of Ukraine
No. 1547 as of 09.05.2024

Pursuant to the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine № 1188
dated 24.09.2020 (Appendix 5), the journal is included in the List of scientific professional publications
of Ukraine (category “B”) in the field of economic and technical sciences
(051 – Economics, 073 – Management, 133 – Industry engineering,
271 – Maritime and inland transport, 275 – Transport technologies (by type).

Founder:
Odessa National Maritime University
Ukraine, 65029, Odesa, 34 Mechnykova St.

Editorial Board:
Editor-in Chief: Doctor of Engineering, Professor *Rudenko S.V.*
Deputy Editor-in Chief: DSc, Professor *Savelieva I.V.*
Executive Secretary: DSc, Associate Professor *Minchev D.S.*

Editorial Board Members:

DSc, Prof. *Varbanets R.A.*, ONMU;
DSc, Prof. *Dubrovskiy M.P.*, ONMU;
DSc, Prof. *Yehupov K.V.*, ONMU;
DSc, Prof. *Postan M.Ia.*, ONMU;
DSc, Prof. *Kyryllova O.V.*, ONMU;
DSc, Prof. *Lapkina I.O.*, ONMU;
DSc, Prof. *Piterska V.M.*, ONMU;
DSc, Prof. *Malaksiano M.O.*, ONMU;
PhD, Associate Prof. *Nemchuk O.O.*, ONMU;
PhD, Associate Prof. *Melnykov S.V.*, ONMU;
Filina-Davidovych L.S., Doctor of Engineering,
West Pomeranian University of Technology,
Szczecin, Poland;
Aymelek Murat, PhD, Izmir Katip Celebi University,
Turkey;
Maleki Vishkaei Behzad, PhD, Luiss University,
Italy;
Kolmykova Anna, DSc, University of Bremen,
Germany;
Lyubomirov Slavi Yassenov, PhD, University
of Plovdiv Paisii Hilendarsk, Bulgaria;

Duhovnik Joze, DSc, University of Ljubljana, Slovenia;
Gasanov V., Doctor of Engineering, Professor,
Azerbaijan State Marine Academy, Azerbaijan;
Sadigov V., PhD in Engineering, Associate Professor,
Azerbaijan State Marine Academy, Azerbaijan;
Dashkovskiy Sergey, DSc, Julius-Maximilians
University of Wurzburg, Germany;
Klyus Oleh, DSc, Maritime University of Szczecin,
Poland;
Csiszar Csaba, PhD, Budapest University
of Technology and Economics, Hungary;
Ngoc An Minh, PhD, Kochi University
of Technology, Japan;
Medvedev Alexander, DSc, Transport
and telecommunication institute, Latvia;
Popova Jelena, DSc, Transport
and telecommunication institute, Latvia;
Mezitis Mareks, DSc, Transport Academy, Latvia;
Nam Kyu Park, PhD, TongMyong University,
South Korea.

Recommended for printing by the Academic Council of Odessa National Maritime University
(Minutes No 10 dated May 20, 2024)

Authors are responsible for the reliability of facts, quotes, proper names, geographical names,
names of enterprises, organizations, institutions and other information.

The Editorial Board may not share the authors' opinion
and assumes no responsibility for the content of manuscripts.

Reprinting and translation are allowed with the consent of author and editors.

The articles were checked for plagiarism using the software StrikePlagiarism.com
developed by the Polish company Plagiat.pl.

З М І С Т

МЕНЕДЖМЕНТ

Ю.В. Бичковський, О.М. Мельник, М.П. Булгаков

Метод визначення стресового навантаження членів екіпажу судна шляхом контролю за рівнем кортизолу.....7

Т.А. Kovtun, L.V. Dmytrieva

Reengineering as a stage of the micro-logistics system life cycle.....18

Т.А. Ковтун, О.В. Меркт, І.О. Фіногенова

Маркетинг-орієнтоване управління наданням фахових освітніх послуг.....27

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

А.О. Ловська, А.О. Мурад'ян, О.В. Демидюков

Дослідження вертикальної динаміки вагона-платформи, завантаженого з'ємними модулями при русі стиковою нерівністю.....35

МОРСЬКИЙ ТА ВНУТРІШНІЙ ВОДНИЙ ТРАНСПОРТ

В.І. Залож

Огляд сучасних тенденцій розвитку систем діагностики судових дизельних двигунів по параметрам робочого процесу.....44

V.I. Kholdenko

The impact of heat-exchangers surface fouling and the possibilities of their cleaning.....57

О.М. Шумило

Комплексна оцінка впливу розмірної модернізації на ходовість і пропульсивні характеристики круїзних суден.....73

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

Н.В. Судник, А.І. Софронов

Огляд фрахтового ринку України в умовах війни.....91

О.Т. Чернова

Особливості вибору ізотермічних резервуарів для зберігання скраплених природних газів.....100

C O N T E N T S

MANAGEMENT

Yu.V. Bychkovsky, O.M. Melnyk, M.P. Bulgakov The method of determining the stress burden of ship crew members by monitoring the level of cortisol.....	7
T.A. Kovtun, L.V. Dmytrieva Reengineering as a stage of the micro-logistics system life cycle.....	18
T.A. Kovtun, O.V. Merkt, I.O. Finohenova Marketing-oriented management of professional educational services.....	27

INDUSTRIAL MECHANICAL ENGINEERING

A.O. Lovska, A.O. Muradian, O.V. Demydiakov Research of the vertical dynamics of a platform wagon loaded by removable modules when running over a rail joint.....	35
--	-----------

MARITIME AND INLAND TRANSPORT

V.I. Zalozh Overview of modern trends in the development of marine diesel engine performance diagnostic systems.....	44
V.I. Kholdenko The impact of heat-exchangers surface fouling and the possibilities of their cleaning.....	57
O.M. Shumylo Comprehensive assessment of the impact of dimensional modernization on the performance and propulsion characteristics of cruise ships.....	73

TRANSPORT TECHNOLOGIES (BY TYPE)

N.V. Sudnyk, A.I. Sofronov Review of Ukraine's freight market during the war.....	91
O.T. Chernova Features of choosing isothermal tanks for storage of liquefied natural gases.....	100

МЕНЕДЖМЕНТ

УДК 629.362

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2024.1-20.01>

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ СТРЕСОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ ЧЛЕНІВ ЕКІПАЖУ СУДНА ШЛЯХОМ КОНТРОЛЮ ЗА РІВНЕМ КОРТИЗОЛУ

Ю.В. Бичковський¹, О.М. Мельник², М.П. Булгаков³

¹старший викладач кафедри навігації і керування судном,
Одеський національний морський університет,
капітан далекого плавання, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0003-1459-9029

²к.т.н., доцент, доцент кафедри судноводіння і морської безпеки,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
капітан далекого плавання,
ORCID ID: 0000-0001-9228-8459

³к.т.н., доцент, доцент кафедри судноводіння і морської безпеки,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-7172-8678

Анотація

Вступ. Визначення рівня стресового навантаження є однією з найважливіших проблем сучасного менеджменту. Дана робота присвячена проблемі використання аналізу стресового навантаження шляхом постійного контролю за рівнем кортизолу у працівників, які мають високий рівень стресового навантаження в процесі виконання професійних обов'язків. Перелік таких професій дуже широкий, тому автори зосередилися на працівниках транспортної галузі, зокрема працівниках водного транспорту. **Мета.** Дана стаття вивчає вплив стресового навантаження на рівень безпеки судноплавства. Автори статті стверджують, що постійний контроль за стресовим навантаженням у судноводіїв може допомогти зменшити кількість аварій з суднами. Саме така категорія працівників, як правило, часто виконує власні службові обов'язки у стані підвищеного стресового навантаження, що є причиною багатьох аварій з суднами у різних районах Світового океану. **Результати.** Виявлено, що помічники капітанів мають вищий рівень кортизолу, ніж капітани. Це може бути пов'язано з меншим досвідом роботи помічників капітанів. Зміни у погодних умовах викликали зростання рівня кортизолу у судноводіїв. Це свідчить про важливість врахування погодних умов у розробці робочих графіків та умов контрактів для моряків. Дослідження також підтвердило взаємозв'язок між харчуванням, відпочинком та рівнем стресу. Рекомендації щодо належного харчування та регулярного відпочинку можуть сприяти зменшенню стресового навантаження. Саме тому необхідний постійний контроль за стресовим навантаженням працівників, що дасть можливість зменшити кількість аварій із суднами та запобігти численним наслідкам,

які виникають у результаті аварій. Дослідження присвячене оцінці стресового навантаження у судноводіїв на основі аналізу рівня кортизолу. Для цього використовувалася методика збору сечі та лабораторних досліджень з урахуванням факторів, таких як вік, досвід роботи та умови навколишнього середовища. Результати показали зростання рівня кортизолу у помічників капітанів, особливо за несприятливих погодних умов. Застосування цього методу виявило можливість оперативного контролю за рівнем стресу та регулювання навантаження на судноводіїв. Дослідження також підкреслило вплив харчування та відпочинку на рівень стресу. Запропоновано рекомендації стосовно змін робочих умов, які були прийняті на практиці судновласником, включаючи порядок зміни судноводіїв та скорочення термінів контрактів залежно від сезону. Загальні висновки дозволяють розглядати цей метод як ефективний інструмент для вимірювання стресового стану моряків та забезпечення безпеки судноплавства. **Висновки.** Вимірювання рівня кортизолу в сечі є ефективним методом оцінки стресового навантаження у судноводіїв. Його використання дозволило оперативно контролювати та адаптувати робочі умови, щоб забезпечити безпеку судноплавства. Необхідно приділяти увагу психологічному стану судноводіїв, особливо помічників капітанів. Необхідно враховувати погодні умови у розробці робочих графіків та умов контрактів для моряків. Рекомендації щодо належного харчування та регулярного відпочинку можуть сприяти зменшенню стресового навантаження у моряків. Необхідно розробляти технологічні засоби для оперативного контролю за рівнем кортизолу, що може забезпечити регулювання стресового навантаження та підвищити безпеку судноплавства.

Ключові слова: людський елемент, кортизол, моніторинг стресу, глюкокортикоїдний гормон, біосенсорика, надниркові залози.

THE METHOD OF DETERMINING THE STRESS BURDEN OF SHIP CREW MEMBERS BY MONITORING THE LEVEL OF CORTISOL

Yu.V. Bychkovsky¹, O.M. Melnyk², M.P. Bulgakov³

¹Senior Lecturer, Department of Navigation and Ship Handling,
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
Master mariner

²PhD, Associate Professor, Department of Seamanship and Maritime Security,
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine
Master mariner

³PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Navigation
and Maritime Safety,
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-7172-8678

Summary

Introduction. Determining the level of stress load is one of the most important problems of modern management. This paper is devoted to the problem of using stress load analysis by continuously monitoring the level of cortisol in employees who have a high level of stress in the course of performing their professional duties. The list of such professions is very wide, therefore, the authors focused on employees of the transport

industry, specifically, water transport workers. **Purpose.** This article examines the impact of stress on the level of shipping safety. The authors of the article argue that constant monitoring of the stress load of navigators can help reduce the number of ship accidents. It is this category of employees who, as a rule, often perform their duties under high stress, which is the cause of many ship accidents in different parts of the world ocean. **Results.** It was found that assistant captains have higher cortisol levels than captains. This may be due to the lesser experience of assistant captains. Changes in weather conditions caused an increase in cortisol levels in shipmasters. This demonstrates the importance of taking weather conditions into account when developing work schedules and contractual terms for seafarers. The study also confirmed the relationship between nutrition, rest and stress levels. Recommendations for proper nutrition and regular rest can help reduce stress. That is why it is necessary to constantly monitor the stress load of employees, which will help reduce the number of ship accidents and prevent numerous consequences that arise as a result of accidents. The study is dedicated to assessing the stress load of shipmasters based on the analysis of cortisol levels. This was done using urine collection and laboratory tests, taking into account factors such as age, work experience and environmental conditions. The results showed an increase in cortisol levels in assistant captains, especially in adverse weather conditions. The application of this method has revealed the possibility of promptly monitoring stress levels and regulating the workload of ship's officers. The study also highlighted the impact of nutrition and rest on stress levels. Recommendations for changes in working conditions were proposed and adopted in practice by the shipowner, including the procedure for changing seafarers and reducing the duration of contracts depending on the season. The general conclusions allow us to consider this method as an effective tool for measuring seafarers' stress and ensuring safety of navigation. **Conclusions.** Measuring urinary cortisol levels is an effective method for assessing the stress load of seafarers. Its use has made it possible to promptly monitor and adapt working conditions to ensure safe navigation. Attention should be paid to the psychological state of seafarers, especially assistant masters. Weather conditions should be taken into account in the development of work schedules and contractual terms for seafarers. Recommendations on proper nutrition and regular rest can help reduce seafarers' stress. Technological means for operational monitoring of cortisol levels should be developed, which can help regulate stress and improve shipping safety.

Key words: human element, cortisol, stress monitoring, glucocorticoid hormone, biosensing, adrenal glands.

Постановка проблеми. Аналіз аварійності суден за останні десять років показав зменшення випадків загибелі суден. Однак протягом останніх років ця цифра зупинилася на позначці близько 55 суден на рік і ми не бачимо тенденції до зменшення цієї кількості. Це свідчить про те, що сумарні зусилля ІМО, держав прапора суден, класифікаційних товариств, судновласників та портових адміністрацій дали певний результат для зменшення кількості випадків загибелі суден. Коливання випадків близько 55 випадків/рік свідчать про те, що наявність деяких причин не дозволяє досягнути подальшого зменшення кількості випадків загибелі. Серед цих причин головною, на думку авторів, є людський фактор,

зокрема фактор стресу. Багато разів автори звертали увагу на це питання. Одним із найважливіших питань щодо стресу є питання визначення фактичного рівня стресу у людини. На даний час не існує 100% інструменту впевненого визначення стресу. У багатьох випадках ця оцінка виконується на підставі виконання письмового тестування людини та аналізу результатів тестування для прийняття рішення. В інших випадках виконується аналіз стану людини з урахуванням низки факторів (поведінка, спілкування, рух тіла, очей тощо). На жаль, такий підхід не дає чіткого визначення рівня стресу людини та не може бути використаний для надання будь-яких обґрунтованих рекомендацій щодо необхідних заходів, яких необхідно вживати для зменшення стресового навантаження.

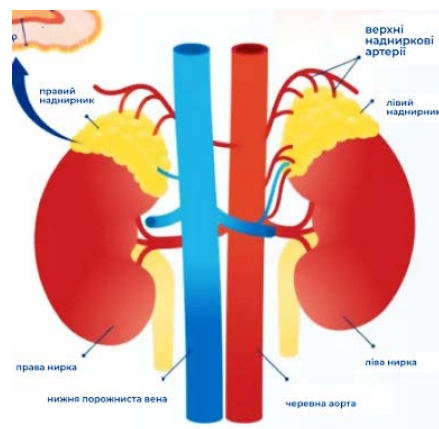


Рис. 1. Схема розташування надниркових залоз [8]

Серед працівників медичної галузі давно відомий взаємозв'язок між рівнем стресу та кількістю кортизолу у людини. Виконання контролю за рівнем кортизолу дає можливість визначити зростання рівня стресу та своєчасно прийняти комплекс дій для зменшення стресового навантаження.

Кортизол – це гормон, що утворюється у надниркових залозах. Він захищає організм від стресу, регулює рівень артеріального тиску, бере участь в обміні білків, жирів та вуглеводів.

Однак у цьому питанні не все так просто. Причина цього криється в тому, що існує низка інших факторів, які також впливають на рівень кортизолу у людини. Це такі фактори: наявність захворювань у людини, вік та стан, якість їжі тощо. Усе це не дозволяє отримати чітку картину для виконання аналізу стресового навантаження людини з необхідною точністю.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Під час роботи над даною статтею автори звернули увагу на рішення цього питання на підставі аналізу багатьох робіт фахівців морської та медичної галузі. Так, тривалий вплив стресу і вивільнення кортизолу з кори надниркових залоз було розглянуто у роботах “Cortisol detection methods for stress monitoring in connected health” [1], “Study on Serum Cortisol and Perceived Stress Scale in the Police Constables” [4], “Cortisol detection methods for stress monitoring in connected health” [5], “Wearable and Implantable Cortisol-Sensing Electronics for Stress Monitoring” [6], “Cortisol Monitoring Devices

toward Implementation for Clinically Relevant Biosensing In Vivo” [7] та в інших публікаціях. Стрес впливає на багато інших біомаркерів, але кортизол вважається найважливішим і потенційно клінічно корисним біомаркером для оцінки та моніторингу стресу.

Мета статті – продемонструвати ефективність використання рівня кортизолу в сечі як методу оцінки стресового навантаження у судноводіїв. Додаткові цілі статті включають аспекти висвітлення впливу досвіду та робочих умов на рівень стресу у судноводіїв, акцентують увагу на необхідності врахування психофізіологічних аспектів морської праці та надають підстави для впровадження систем моніторингу психофізіологічного стану моряків.

Виклад основного матеріалу. Автори даної публікації протягом декількох місяців спостерігали за рівнем кортизолу у судноводіїв днопоглиблювального каравану в акваторії порту Чорноморська. Вибір об’єкту для спостереження базувався на підставі чіткого розуміння того, що саме судноводії цієї групи отримують дуже високе стресове навантаження через виконання великої кількості самостійних швартувань в різних погодних умовах за добу. За умовами праці серед восьми членів екіпажу шаланди тільки капітан і його помічник знаходяться під впливом постійних високих стресових навантажень. Так, протягом часу спостереження було відмічено виконання до 25 підходів і відходів шаланд до земснаряду в межах дуже обмеженої акваторії для підходу через наявність багатьох канатів якорів, на яких стоїть земснаряд. Це виконувалося у різний час доби, в різних умовах видимості. Часто під час маневрування судноводії були змушені компенсувати негативний вплив вітру та течії, що викликало додаткове навантаження на них. Цілком зрозуміло, що робота в таких умовах викликала постійне зростання стресового навантаження. Наприклад, серед капітанів торговельного флоту є багато тих, хто під час своєї роботи на посаді капітана не виконав жодного самостійного швартування без допомоги лоцмана та буксирів.

Кортизол в багатьох наукових публікаціях також називають гормоном стресу. Коли ваше тіло відчуває загрозу – фізичну чи психологічну, мозок посилає сигнал у надниркові залози, а вони у відповідь виробляють кортизол.

Цей гормон відіграє ключову роль у покращенні уваги, стимулює кровообіг та сприяє синтезу глюкози. Ці процеси сприяють виділенню додаткової енергії, щоб організм ефективніше впорався із стресом. Саме цей підхід до визначення стресового навантаження було використано під час проведення дослідження. За підтримки керівництва компанії-судновласника “White Forms Contractors Ltd” для отримання максимально точних результатів спостережень автори вжили таких заходів:

- перед початком роботи за контрактом усі судноводії здавали аналіз добового рівня кортизолу. Серед наявних способів виконання аналізу було обрано визначення рівня кортизолу через аналіз сечі. Автори керувалися у власному виборі методу дослідження тим, що по-перше, близько 10% вільного кортизолу знаходиться у сечі, по-друге, тим, що взяття цього аналізу є зовсім простим і не викликає необхідності присутності медичного працівника;

- після впевненості у тому, що на первинний рівень кортизолу не впливає будь-яка хвороба, проблема, подальше спостереження за рівнем стресового навантаження виконувалося від відправного, первинного значення;

– додатково згідно з домовленостями судноводії першої шаланди зобов'язалися дотримуватися наших рекомендацій щодо якості їжі та напоїв, а на другій шаланді таких обмежень не було;

– аналізи збиралися щотижня станом на ранок, обід та вечір. Лабораторні результати з середньої кількості кортизолу кожного з судноводіїв отримувалися через декілька діб.

Для розуміння ходу виконання дослідження необхідно надати декілька пояснень, які дозволять зрозуміти хід виконання цього спостереження. Ми зауважили, що рівень кортизолу не є постійним для різних вікових груп працівників у різний час доби. Так, для чоловіків старшої вікової групи (понад 51 рік) ранкові показники будуть в межах 1,49–7,39 нг/мл, опівдні – 0,95–6,8 нг/мл, увечері – 0,22–2,54 нг/мл. Для чоловіків віком від 31 року до 51 року ці показники будуть такими: ранок – 0,94–15,1 нг/мл, опівдні – 0,4–6,4 нг/мл, а увечері – < 1,81 нг/мл. Також і середній за добу рівень кортизолу у цих вікових груп буде різним: для старшої вікової групи – 0,51–4,2 нг/мл, а для середньої вікової групи – 0,18–4,3 нг/мл.

У таблиці 1 розміщені результати первинного середнього аналізу кортизолу за добу для судноводіїв шаланд.

Таблиця 1

Рівень кортизолу у судноводіїв до початку роботи

Шаланда «Ізмаїльська»		Шаланда «Куяльницька»	
капітан	помічник капітана	капітан	помічник капітана
одиниці вимірювання нг/мл			
2,7	1,4	2,3	1,8

[за результатом дослідження]

Так, обидва капітани суден були практично одного віку – близько 60 років, їхні помічники входили до вікової групи від 31 до 51 року. Усі члени екіпажу не мали хронічних захворювань, медичних проблем чи невирішених питань у сім'ї. Отже, перед початком дослідження не передбачалося жодних можливих впливів, які могли б спотворити результати. Судноводії на шаланді «Ізмаїльська» за їхньою згодою були взяті під контроль у їхньому харчуванні. Вони дотримувалися належного раціону, утримувались від вживання кави, солодощів тощо, що могло б впливати на рівень кортизолу. А для судноводіїв на шаланді «Куяльницька» не існувало жодних обмежень у харчуванні чи вживанні напоїв. Після завершення першого тижня роботи судноводіїв здали аналізи, результати яких надано у таблиці 2.

Таблиця 2

Рівень кортизолу у судноводіїв за перший тиждень роботи

Шаланда «Ізмаїльська»		Шаланда «Куяльницька»	
капітан	помічник капітана	капітан	помічник капітана
одиниці вимірювання нг/мл			
2,9	1,9	2,7	2,5

[за результатом дослідження]

Аналізуючи отримані результати, ми помітили деякі нюанси, а саме:

– підвищення рівня кортизолу було значнішим у помічників капітанів. Це цілком зрозуміло, оскільки досвід роботи капітанів не викликав особистих занепокоєнь щодо дотримання безпеки суден. Це цілком підтверджує, що тренувана людина готова до будь-яких змін у розвитку ситуації під час виконання маневрування, навіть негативного характеру, що не викликає значного збільшення стресового навантаження. А нестача досвіду і тренувань викликає значне зростання стресового навантаження;

– стан погоди під час роботи був звичайним для зимового часу (стан вітру – 3–4 бали, стан моря – 2–3 бали).

Результати аналізів рівня кортизолу за другий тиждень роботи судноводіїв надано у таблиці 3.

Таблиця 3

Рівень кортизолу у судноводіїв за другий тиждень роботи

Шаланда «Ізмаїльська»		Шаланда «Куяльницька»	
капітан	помічник капітана	капітан	помічник капітана
одиниці вимірювання нг/мл			
3,5	3,4	3,8	3,7

[за результатом дослідження]

Протягом цього тижня було відмічено погіршення погодних умов (зростання вітру до 4–5 балів і стану моря до 3–4 балів). Отже, зріс рівень кортизолу у судноводіїв.

У таблиці 4 надано результати рівня кортизолу у судноводіїв за третій тиждень роботи.

Таблиця 4

Рівень кортизолу у судноводіїв за третій тиждень роботи

Шаланда «Ізмаїльська»		Шаланда «Куяльницька»	
капітан	помічник капітана	капітан	помічник капітана
одиниці вимірювання нг/мл			
4,2	4,5	4,7	4,9

[за результатом дослідження]

Погодні умови протягом цього тижня не змінилися.

Дані за четвертий тиждень роботи судноводіїв надані у таблиці 5.

Таблиця 5

Рівень кортизолу у судноводіїв за четвертий тиждень роботи

Шаланда «Ізмаїльська»		Шаланда «Куяльницька»	
капітан	помічник капітана	капітан	помічник капітана
одиниці вимірювання нг/мл			
3.9	4.5	4.5	4.8

[за результатом дослідження]

Протягом цього тижня через штормові погодні умови шаланди більше часу провели біля причалів. Зростання рівня кортизолу не відмічено, а у деяких судноводіїв рівень навіть зменшився. Цей факт є дуже цікавим. По-перше, це підтверджує взаємозв'язок між втомою і стресом, по-друге, цей факт дає підтвердження можливості зменшення стресового навантаження через надання необхідного відпочинку.

Дані за п'ятий тиждень роботи надані у таблиці 6.

Таблиця 6

Рівень кортизолу у судноводіїв за 5 тиждень роботи

Шаланда «Ізмаїльська»		Шаланда «Куяльницька»	
капітан	помічник капітана	капітан	помічник капітана
одиниці вимірювання нг/мл			
4,4	5,1	5,0	5,6

[за результатом дослідження]

Після отримання результатів рівня кортизолу за п'ятий тиждень роботи автори звернули увагу судновласника на необхідність приготування своєчасної зміни судноводіїв для відпочинку через високий рівень стресового навантаження. Для судновласника було наведено можливі наслідки для загальної безпеки судноплавства через високий рівень стресового навантаження.

По закінченню шостого тижня роботи судноводіїв отримані результати рівня кортизолу були представлені у таблиці 7.

Таблиця 7

Рівень кортизолу у судноводіїв за 6 тиждень роботи

Шаланда «Ізмаїльська»		Шаланда «Куяльницька»	
капітан	помічник капітана	капітан	помічник капітана
одиниці вимірювання нг/мл			
4,8	5,9	6,6	6,9

[за результатом дослідження]

Отримавши ці результати, автори переконали судновласника в тому, що подальше продовження роботи цих судноводіїв може бути небезпечним з точки зору безпеки через високе стресове навантаження. Судновласник прийняв точку зору авторів і виконав заміну судноводіїв на судах-шаландах. Додатково за рекомендацією авторів статті було зменшено термін дії контрактного договору взимку до 1,5 місяця, влітку – до 2 місяців.

Діаграма рівня кортизолу у судноводіїв за шість тижнів надана на рисунках 2,3.

Дослідження рівня кортизолу у судноводіїв вказує на важливість врахування психофізіологічних аспектів морської праці. Виконання контролю за рівнем кортизолу супроводжувалося ретельним контролем за психофізіологічним станом судноводіїв. Нагляд виконувався за поведінкою судноводіїв (рух тіла, очей, ведення спілкування) їхнім артеріальним тиском, пульсом тощо. Виявлено, що досвід та робочі умови суттєво впливають на рівень стресу у моряків. Особливу увагу слід приділити питанням безпеки та здоров'я судноводіїв, враховуючи не лише фізичний, а й психічний аспекти їхнього благополуччя. Проведене дослідження



Рис. 2. Зростання рівня кортизолу у судноводіїв шаланди «Ізмаїльська» [за результатами спостереження]



Рис. 3. Зростання рівня кортизолу у судноводіїв шаланди «Куюльницька» [за результатами спостереження]

надає підстави для впровадження систем моніторингу психофізіологічного стану моряків, зокрема застосування сучасних технологій для контролю рівня кортизолу та вдосконалення організації праці в морському середовищі.

Висновки. Дослідження продемонструвало, що вимірювання рівня кортизолу в сечі є ефективним методом оцінки стресового навантаження у судноводіїв. Його використання дозволило оперативнo контролювати та адаптувати робочі умови, щоб забезпечити безпеку судноплавства. Виявлено, що помічники капітанів мають вищий рівень кортизолу, що може бути пов'язано з їхнім меншим досвідом роботи. Це підкреслює необхідність уваги до психологічного стану менш досвідчених працівників. Зміни у погодних умовах викликали зростання рівня кортизолу, особливо під час другого та третього тижня роботи. Це свідчить про важливість врахування погодних умов у розробці робочих графіків та умов контрактів

для моряків. Дослідження підтвердило взаємозв'язок між харчуванням, відпочинком та рівнем стресу. Рекомендації щодо належного харчування та регулярного відпочинку можуть сприяти зменшенню стресового навантаження. У результаті проведеного дослідження були внесені позитивні зміни у робочі умови, такі як заміна судноводіїв та скорочення термінів контрактів. Ці заходи призначені для забезпечення безпеки та психофізичного здоров'я моряків. Виокремлено необхідність розробки технологічних засобів для оперативного контролю за рівнем кортизолу, що може забезпечити регулювання стресового навантаження та підвищити безпеку судноплавства.

ЛІТЕРАТУРА

1. Cortisol detection methods for stress monitoring in connected health. *Health Sciences Review* URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772632023000053> <https://doi.org/10.1016/j.hsr.2023.100079> (date of access: 20.10.2023).
2. Cortisol Test. Cleveland Clinic. URL: <https://my.clevelandclinic.org/health/diagnostics/22417-cortisol-test/> (date of access: 14.10.2023).
3. Assessing population-level stress through glucocorticoid hormone monitoring in wastewater / E.M. Driver, A.J. Gushgari, J.C. Steele, D.A. Bowes, R. Halden. *Science of The Total Environment*. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969722030583> DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.155961 (date of access: 15.10.2023).
4. Walvekar S.S., Ambekar J.G., Devaranavadagi B.B. Study on Serum Cortisol and Perceived Stress Scale in the Police Constables. *Journal of Clinical and Diagnostic Research*. 2015. Vol. 9 (2). P. 10–14. <https://doi.org/10.7860/JCDR/2015/12015.5576>.
5. Cortisol detection methods for stress monitoring in connected health / T. Iqbal, A. Elahi, W. Wijns, A. Shahzad. *Health Sciences Review*. DOI: 10.1016/J.HSR.2023.100079 (date of access: 15.10.2023).
6. Wearable and implantable cortisol-sensing electronics for stress monitoring / J. Ok, S. Park, Y.H. Jung, T.I. Kim. DOI: 10.1002/adma.202211595 (date of access: 10.11.2023).
7. Kusov P.A., Kotelevtsev Y.V. Drachev V.P. Cortisol monitoring devices toward implementation for clinically relevant biosensing in vivo. DOI: 10.3390/molecules28052353 (date of access: 05.11.2023).
8. Melnyk O., Bychkovsky Y., Voloshyn A. Maritime situational awareness as a key measure for safe ship operation. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series "Transport"*. URL: [https://doi.org/10.20858/sjsutst.2022.114.8_\(date of access: 05.11.2023\)](https://doi.org/10.20858/sjsutst.2022.114.8_(date of access: 05.11.2023)).

REFERENCES

1. Health Sciences Review (2023). Cortisol detection methods for stress monitoring in connected health. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772632023000053> DOI: 10.1016/j.hsr.2023.100079.
- 2.

3. Cleveland Clinic (2023). Cortisol Test. URL: <https://my.clevelandclinic.org/health/diagnostics/22417-cortisol-test/>.
4. Driver, E. M., Gushgari, A. J., Steele, J. C., Bowes, D. A., Halden, R. (2022). Assessing population-level stress through glucocorticoid hormone monitoring in wastewater. *Science of The Total Environment*. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969722030583> DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.155961.
5. Walvekar, S. S., Ambekar, J. G., Devaranavadi, B. B. (2015). Study on Serum Cortisol and Perceived Stress Scale in the Police Constables. *Journal of Clinical and Diagnostic Research*. DOI: 10.7860/JCDR/2015/12015.5576.
6. Iqbal, T., Elahi, A., Wijns, W., Shahzad, A. (2023). Cortisol detection methods for stress monitoring in connected health. *Health Sciences Review*. DOI: 10.1016/J.HSR.2023.100079.
7. Ok, J., Park, S., Jung, Y. H., Kim, T. I. (2023). Wearable and Implantable Cortisol-Sensing Electronics for Stress Monitoring. DOI: 10.1002/adma.202211595.
8. Kusov, P. A., Kotelevtsev, Y. V., Drachev, V. P. (2023). Cortisol Monitoring Devices toward Implementation for Clinically Relevant Biosensing In Vivo. DOI: 10.3390/molecules28052353.
9. Melnyk, O., Bychkovsky, Y., Voloshyn, A. (2022). Maritime situational awareness as a key measure for safe ship operation. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, URL: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2022.114.8>.

REENGINEERING AS A STAGE OF THE MICRO-LOGISTICS SYSTEM LIFE CYCLE

T.A. Kovtun¹, L.V. Dmytrieva²

¹Ph.D., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Management of Logistics Systems and Projects,
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-5410-4783

²Senior Lecturer at the Department of Management of Logistics Systems and Projects,
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0003-1449-9888

Summary

Introduction. The modern business environment poses new challenges to enterprises, which requires, in particular, the application of a logistics approach and consideration of enterprise management processes as a micro-logistics system. This allows not only to take into account the peculiarities of the development of a company throughout its life cycle, but also provides an opportunity to effectively manage the duration of individual stages of their life cycle. Lifecycle analysis is a widely used tool for substantiating strategic choices aimed at the regular emergence of new products and the development of promising types of business. An important and relevant task is to study different views on the main stages of the life cycle of an enterprise as a micro-logistics system. Special attention should be paid to the study of the processes of managing the decline stage in the life cycle, which remains insufficiently studied, namely the use of the reengineering mechanism at this stage. **Purpose.** The purpose is to determine the peculiarities of the development of the decline phase in the life cycle of an enterprise as a period of time during which it is advisable to use reengineering to simplify and modernise the business processes of an enterprise as a micro-logistics system. **Results.** The results of the study are to substantiate the potential to consider the enterprise as a micro-logistics system and to determine its inherent nature of both the logistics and design systems. The processes of managing the stage of decline in the life cycle have been studied, and it does not necessarily have to end with the 'death' or liquidation of the enterprise. It is substantiated that reengineering can be considered an option for its 'revival' or 'transformation', as well as the possibility of phased introduction of not only new business processes, but also the production of many different products. **Conclusions.** Based on the analysis, the study proves that reengineering should be considered not only as a tool that can significantly extend the life cycle of an enterprise's products, optimise and improve processes at each stage of its life cycle, and adapt them to new realities and opportunities, but also as a life cycle stage that replaces the stage of enterprise decline. Such an approach, combined with a project-based approach to managing an enterprise as a micro-logistics system, will significantly increase the efficiency of its operations and have a positive impact on competitiveness in a turbulent market.

Key words: project, reengineering, business processes, life cycle, micro-logistics system, models of enterprise life cycles.

РЕІНЖИНІРИНГ ЯК ЕТАП ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ
МІКРОЛОГІСТИЧНОЇ СИСТЕМИ

Т.А. Ковтун¹, Л.В. Дмитрієва²

¹д.т.н., професор кафедри «Управління логістичними системами і проектами»,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-5410-4783

²старший викладач кафедри «Управління логістичними системами і проектами»,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0003-1449-9888

Анотація

Вступ. Сучасні умови господарювання ставлять перед підприємствами нові завдання, що потребують, зокрема, застосування логістичного підходу та розгляду процесів управління підприємством як мікрологістичною системою. Це дозволяє не тільки врахувати особливості розвитку підприємства протягом його життєвого циклу, а й надає можливість ефективного управління тривалістю окремих етапів його життєвого циклу. Аналіз життєвого циклу є широкоживаним інструментом обґрунтування стратегічного вибору, спрямованого на регулярну появу нових продуктів і розвиток перспективних видів бізнесу. Важливим та актуальним постає завдання вивчення різних поглядів на основні етапи життєвого циклу підприємства як мікрологістичної системи. Особливо потрібно приділити увагу дослідженню процесів управління етапом занепаду в життєвому циклі, який залишається недостатньо вивченим, а саме застосуванню на цьому етапі механізму реінжинірингу. **Мета.** Метою дослідження є визначення особливостей розвитку фази занепаду в життєвому циклі підприємства як періоду часу, протягом якого доцільно використовувати реінжиніринг задля спрощення та модернізації бізнес-процесів підприємства як мікрологістичної системи. **Результати.** Результатами дослідження є обґрунтування потенційної можливості вважати підприємство мікрологістичною системою, визначення притаманності йому як логістичної, так і проектної системи. Досліджено процеси управління етапом занепаду в життєвому циклі, причому він зовсім не обов'язково має завершуватися «смертю», ліквідацією підприємства. Обґрунтовано те, що реінжиніринг може вважатися варіантом його «відродження» або «перетворення», а також можливістю поетапного впровадження не тільки нових бізнес-процесів, а і виробництва безлічі різноманітних продуктів. **Висновки.** На основі проведеного дослідження доведено, що реінжиніринг варто розглядати не тільки як інструмент, що може значно продовжити життєвий цикл продуктів підприємства, оптимізувати та вдосконалити процеси на кожному етапі його життєвого циклу, адаптувати їх до нових реалій та можливостей, але й як етап життєвого циклу, що замінює етап занепаду підприємства. Такий підхід у поєднанні з проектним підходом до управління підприємством як мікрологістичною системою дозволить значно підвищити ефективність його діяльності та позитивно вплине на конкурентоспроможність в умовах турбулентного ринку.

Ключові слова: проект, реінжиніринг, бізнес-процеси, життєвий цикл, мікрологістична система, моделі життєвих циклів підприємств.

Introduction. In modern market conditions, characterized by a high degree of turbulence, a successful enterprise must possess appropriate adaptive properties, since even a technological competitive advantage becomes a short-term one. In the management of enterprises, the emphasis is shifted from managing individual resources to managing dynamic business processes, including logistic ones, because in general any enterprise is a micro-logistic system [1].

An effective management requires an integrated use of various methods and models of management. A large-scale application of the project management methodology tools led to formation of a project approach to the enterprise management, i.e. its activity is viewed through the prism of ongoing projects. Considering an enterprise as a micro-logistic system, one can say that it has features of both a logistic and a project system [2]. The general idea that is reflected in both concepts is the “lifecycle”, which is commonly understood as the activities of all supporting systems leading the target system from its concept to decommissioning [3].

The lifecycle model is one of the well-known tools used to describe the development process of any system: technical, biological, economic, social. Based on the lifecycle model, individual factors affecting organizational effectiveness can be analyzed at various stages of existence.

Analysis of recent studies and publications. We should take note of foreign scientists, in the writings of which the fundamentals of the lifecycle models were laid: I. Adizes, L. Greiner, B. Scott and R. Bruce, M. Davis [4; 5; 6; 7]. The study of the lifecycle involved such ukrainian scientists, as O.I. Gudzyk, S.V. Koryagina, Zh.V. Poplavska, O.V. Arefieva [8; 9; 10; 11], etc.

To date, 8 lifecycle models are widely known, namely: A. Downs’ model, G. Lippitt and W. Schmidt’s model, L. Greiner’s model, W. Tornbert’s model, D. Katz and R. Kahn’s model, J. Kimberly’s model, I. Adizes’ model, E. Schein’s model.

In their models, the scientists proposed the main stages of an organization development:

– A. Downs proposed three main stages of growth and development of organizations. The first stage - a struggle for autonomy – occurs before the formal birth or immediately after it. The second stage – a rapid growth - includes rapid expansion, which emphasizes innovation and creativity. The last stage – a deceleration - is characterized by clarification and formalization of rules and procedures.

– G. Lippitt and W. Schmidt developed one of the first lifecycle models of the organization operating in the private sector. They offered to consider a corporation that goes through three stages in development: birth - a creation of management systems and an attainment of viability; youth – a development of stability and reputation; and maturity – an attainment of uniqueness and ability to adapt in changing areas of work (the model describes six basic management tasks that vary from stage to stage).

– L. Greiner argues that the life of an organization consists in moving through the stages where each evolutionary period creates its own revolution. The revolution is seen as a turbulent period in the organization development, requiring a serious review of management methods. The path of the organization from one stage of its development to the next one lies in overcoming the corresponding crisis of this transition period.

– W. Tornbert considers the model where an organizational development is closely related to the development of a sense of community of personnel. The development comes from

the individuality and diffuseness of the groups to the sense of belonging to and involvement in the team. At the same time, the development mechanisms are not specified.

– D. Katz and R. Kahn are building their own model of organizations development on the careful development of an organizational structure. Accordingly, they propose three main stages of development: a stage of simple systems, a stable stage of organization, and a stage of structures development. After release of this paper, social organizations began to be considered as “open” systems characterized by interaction with an external environment;

– J. Kimberly argues that the first recognizable stage occurs even before the actual creation of an organization. At this stage, alignment of resources and formation of a future ideology take place. All this leads to the transition to the second stage of development, including the choice of “main schemes of movement”, recruitment. The third stage involves formation of an organizational identity. At the fourth stage, the rules become more rigid, the structure becomes formalized, the organization becomes more conservative and predictable in response to the pressure of the external environment;

– I. Adizes presents the model as a natural, phased and programmed number of mandatory phases (stages), providing for an inevitable and phased movement of the organization in the course of development. His theory focuses on two most important parameters of the organization life activity: flexibility and controllability (manageability).

Formulation of the article’s objectives. The purpose is to determine the peculiarities of the development of the decline phase in the life cycle of an enterprise as a period of time during which it is advisable to use reengineering to simplify and modernise the business processes of an enterprise as a micro-logistics system.

Presentation of the main material. At the moment, the most popular and most frequently used lifecycle model is the model of I. Adizes [4], in which the author proposes to consider development of an organization as ten stages of evolution, divided into short periods of organizational changes (Fig. 1).

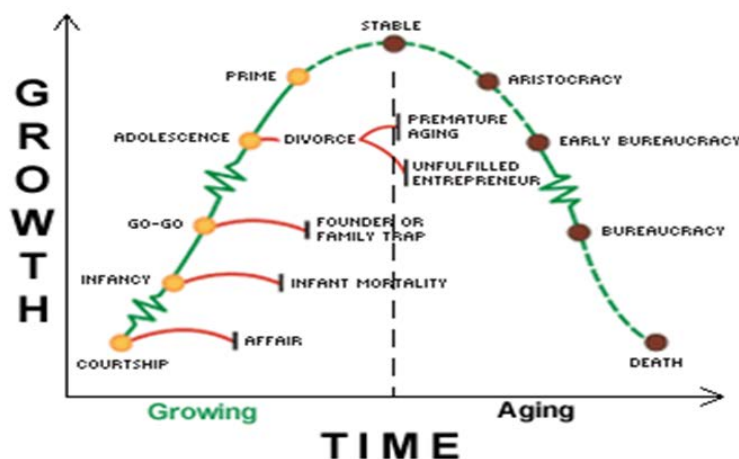


Fig. 1. Stages of development of an organization of I. Adizes

At each stage, an organization will have to face the need to solve various sets of tasks. In this case, the organization managers shall use the appropriate management methods. The most acceptable approach in solving the tasks set is the use of project management tools.

Project stages are usually consistent in nature, but may have parallel links. Together they form the lifecycle of project management. Further, the approved project management lifecycle is often a standard of the organization project management. In fact, the project manager may have no opinion on the approved approach to the lifecycle, but an understanding of different approaches and methodologies can help the project manager to adapt better to the changes [12].

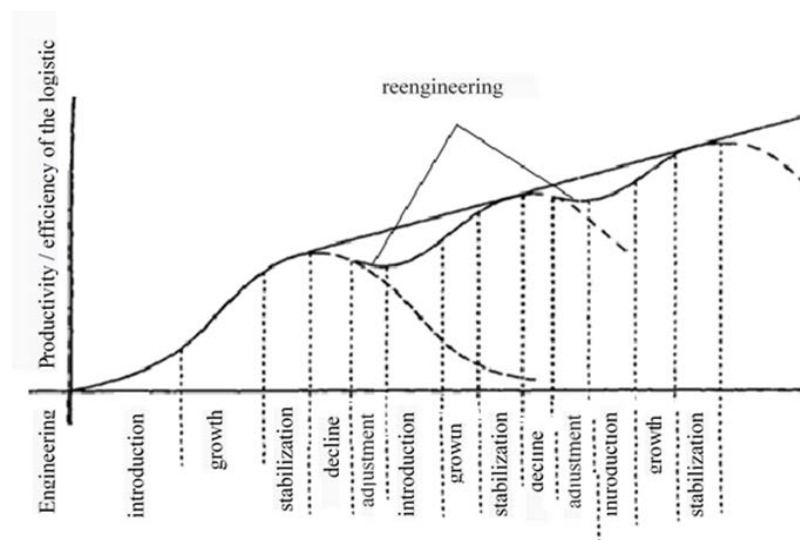


Fig. 2. Stages of the logistic system lifecycle

Among the scientific papers of local scientists studying the lifecycle of an enterprise as a logistic system, one can mark out the researches of Krikavsky E. and Chernopiskaya N.V. They propose to consider the stage of recession in the lifecycle of the logistic system as a period of time during which it is advisable to use reengineering, the purpose of which is to simplify and modernize business processes. (Fig.2). But, unfortunately, in the subsequent study, the authors do not consider the impact of reengineering on the development of the logistics system and changes in the characteristics of its life cycle.

The decline phase is accompanied by the following changes in the activities of the enterprise as a logistics system:

- increase in costs (if the costs of logistics activities begin to exceed the expected profit, this may be a sign of the beginning of the decline phase);
- decrease in efficiency (a decrease in the productivity and effectiveness of logistics processes, for example, an increase in order fulfilment time, an increase in the likelihood of errors and delivery delays, may also indicate the beginning of a downturn)
- decline in service quality (if there is an increase in the number of customer complaints about service quality, delivery delays or other problems, this may indicate

a deterioration in the quality of the logistics system); decline in demand (if demand for an organisation's goods or services is declining due to problems with the logistics system, this may also be a sign of the beginning of a recession);

- increase in inventory and debt (an increase in inventory and debt to suppliers may indicate problems with the company's inventory management and financial position, which may be related to the decline of its logistics system);

- loss of competitiveness (if competitors offer more efficient and better logistics solutions and the company loses market share as a result, this may indicate a decline in the logistics system).

To survive, companies at this stage often make adjustments aimed at improving certain elements of the logistics system. If such adjustments do not achieve the goal, reengineering is used, which is aimed at achieving significant changes [13].

In their opinion, at this stage the adjustments are often resorted that are aimed at improving some elements of the logistic system. When such adjustments do not achieve the intended goals, reengineering is used, which is aimed at achieving significant changes [13]. But, unfortunately, in the further research, the authors do not consider the influence of reengineering on the development of the logistic system and the change of its lifecycle characteristics.

At the stage of reengineering, a phased introduction of new business processes takes place (parallel implementation of old and new business processes is allowed), a quality control and an adjustment of implementation of new business process model are carried out, and the developed business process models and relevant documentation are being adjusted [14].

For each product of an enterprise as a micro-logistic system, its own logistic flows are formed - these can be material, financial, information flows and services. They can intersect and form the logistic network that includes many elements - links of the logistic system, interconnected by material and related flows in the field of a single logistic system of the enterprise (Fig. 3).

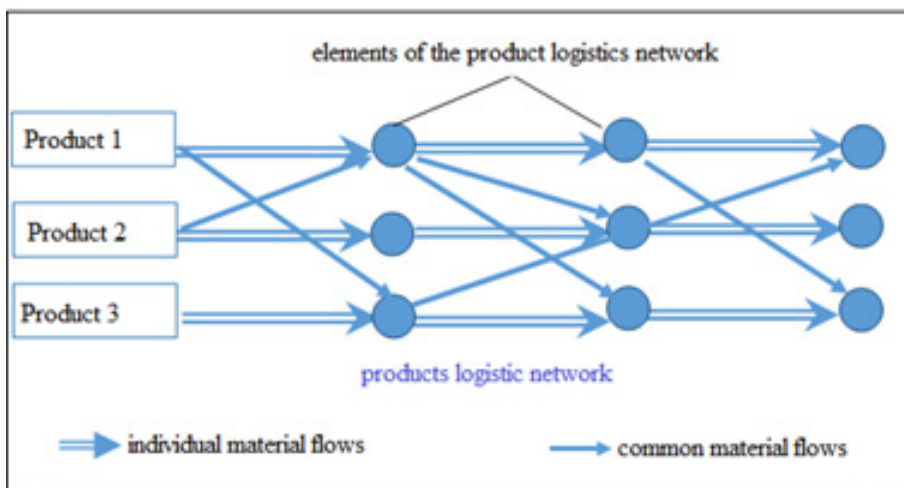


Fig. 3. Material flows of products of an enterprise

Each product has a certain set of consumer qualities, technology of promotion, sales and servicing typical for it, its lifecycle. Total products available to the enterprise, summing up, form the lifecycle of the individual enterprise (Fig. 4).

In addition, products can undergo significant changes (modifications), allowing quick respond to emerging market opportunities. So, when reengineering at the operational phase of each product's lifecycle, the lifecycle of the micro-logistic system can also be significantly extended, which will ensure a strong competitive position in the present, as well as good prospects for the future.

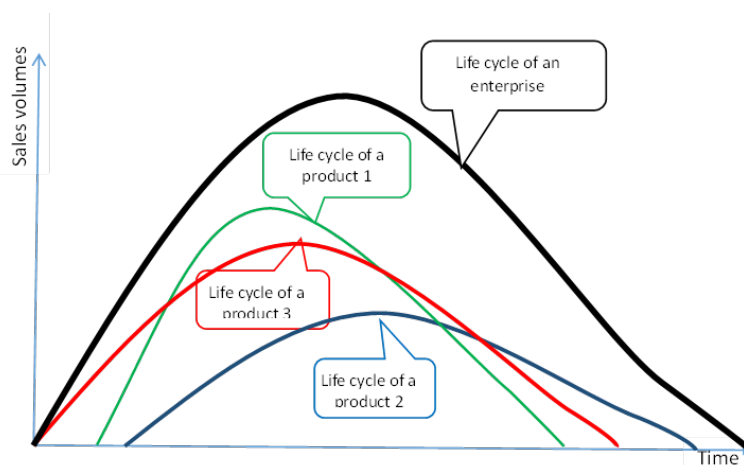


Fig. 4. Total lifecycles of products of an enterprise

Conclusions. Thus, the theory of the organization lifecycle is quite new and promising direction of researches in the field of management. Knowledge of the sequence of the organization development allows seeing the general patterns and features of each stage of the lifecycle, anticipating future changes needed and preparing a company for them. This contributes to its long-term and successful operation, and the inclusion of reengineering, as a stage of radical redesign of business processes to achieve significant improvements in the key performance indicators of a modern enterprise, in the lifecycle of an enterprise allows increasing the duration of the logistic system, which, in turn, leads to an increase in the lifecycle of the product of an enterprise. At the same time, the duration of the product lifecycle stages changes significantly - the duration of the development and implementation phases of the updated product is reduced while ensuring compliance with the required performance specifications and the product technological effectiveness, which in turn leads to an increase in the efficiency of the enterprise as a whole.

BIBLIOGRAPHY

1. Руденко С.В., Ковтун Т.А. Проектний підхід до управління логістичними системами. *Управління проектами у розвитку суспільства* : тези доповідей XIII Міжнародної конференції, м. Київ, 13–14 травня 2016 р. С. 217–219.

2. Дмитрієва Л.В. Обґрунтування доцільності застосування концепції життєвого циклу в управлінні організацією як мікрологістичною системою. *Управління проектами у розвитку суспільства* : тези доповідей XV Міжнародної конференції, м. Київ, 18–19 травня 2018 р. С. 79–80.
3. Gray B., Ariss S.S. Politics and strategic change across organizational life cycle. *Academy of Management Review*. 1985. Vol. 10. № 4. P. 707–723.
4. Adizes I. *Managing corporate lifecycles : how to get to and stay at the top*. Santa Barbara : Adizes Institute Publications, 2004. 484 p.
5. Greiner L.E. Evolution and Revolution as Organizations Grow. *Harvard Business Review*. 1972. Vol. 50. July–August. № 4. P. 37–46.
6. Scott B.R., Bruce R. Five Stages of Growth in Small Business. *Long Range Planning*. 1987. Vol. 20. № 3. P. 45–52.
7. Davis R.C. *The Fundamentals of Top Management*. New York : Harper, Row & Brotkers, 1951.
8. Гудзь О.І. Аналізування сучасних підходів до сутності і структури життєвого циклу підприємства. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія «Менеджмент та підприємництво в Україні: етапи становлення і проблеми розвитку»*. 2011. № 714. С. 52–57.
9. Корягіна С.В. Економічна оцінка та планування життєвого циклу розвитку підприємства : автореф. дис. ... канд. екон. наук : 08.06.01. Львів, 2004. 21 с.
10. Поплавська Ж.В. Сутність життєвого циклу підприємств та фактори, що впливають на його формування. *Науковий вісник Національного лісотехнічного університету*. 2008. № 18.8. С. 169–175.
11. Ареф'єва О.В. Стратегічне забезпечення життєвого циклу підприємства. *Актуальні проблеми економіки*. 2008. № 3. С. 43–49.
12. *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide)–Sixth Edition*, Project Management. ISBN 978-1628251999, 978-1628251845. Project Management Institute, 2017. P. 756.
13. Крикавський Є.В., Чернописька Н.В. *Логістичні системи : навчальний посібник*. Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2009. 264 с.
14. Дмитрієва Л.В. Обґрунтування застосування логістичного реінжинірингу бізнес-процесів. *Управління проектами у розвитку суспільства* : тези доповідей XVIII міжнародної конференції, м. Київ, 15 травня 2021 р. Київ, 2021. С. 143–147.

REFERENCES

1. Rudenko S.V., Kovtun T.A. (2016). Project approach to the management of logistic systems [Proektnyi pidkhid do upravlinnia lohistrychnymy systemamy] / *Theses of the reports of the XIII International Conference “Project Management in the Social Development”*, city of Kyiv, May 13–14 p. 217–219. [in Ukrainian].

2. Dmytrieva L.V. (2018). Justification of feasibility of using the concept of the lifecycle in the management of an organization as a micro-logistic system / [Obhruntuvannia dotsilnosti zastosuvannia kontseptsii zhyttievoho tsykladu v upravlinni orhanizatsiieiu yak mikrolohistychnoiu systemoiu]. *Theses of the reports of the XV International Conference "Project Management in the Social Development"*, city of Kyiv, May 18–19 p. 79–80. [in Ukrainian].
3. Gray B., Ariss S.S. (1985). Politics and strategic change across organizational life cycle // *Academy of Management Review*, vol. 10, No. 4, pp. 707–723.
4. Adizes I. (2004). *Managing corporate lifecycles : how to get to and stay at the top* / Ichak Adizes Ph. D. – Santa Barbara : Adizes Institute Publications, 484 p.
5. Greiner L.E. (1972). Evolution and Revolution as Organizations Grow // *Harvard Business Review*. Vol. 50. July–August. N 4. P. 37–46.
6. Scott B.R., Bruce R. (1987). Five Stages of Growth in Small Business // *Long Range Planning*. Vol. 20. N 3. P. 45–52.
7. Davis R. C. *The Fundamentals of Top Management*. N. Y.: Harper, Row & Brotkers, 1951
8. Gudz O.I. (2015). Analysing modern approaches to the essence and structure of the life cycle of an enterprise [Analizuvannia suchasnykh pidkhodiv do sutnosti i struktury zhyttievoho tsykladu pidpriemstva] // *Bulletin of Lviv Polytechnic National University. Management and entrepreneurship in Ukraine: stages of formation and problems of development*. No. 714. P. 52–57. [in Ukrainian].
9. Koryagina S.V. (2008). Economic assessment and planning of the life cycle of enterprise development:[Ekonomichna otsinka ta planuvannia zhyttievoho tsykladu rozvytku pidpriemstva] PhD thesis / S.V. Koryagina. Lviv, 21 p. [in Ukrainian].
10. Poplavska O.V, Donenko. (2008). The essence of the life cycle of enterprises and factors influencing its formation [Sutnist zhyttievoho tsykladu pidpriemstva ta faktory, shcho vplyvaiut na yoho formuvannia] // *Scientific Bulletin of the National Forestry University*. No. 18.8. - P. 169-175. [in Ukrainian].
11. Arefieva O. V. (2008). Strategic support of the enterprise life cycle [Stratehichne zabezpechennia zhyttievoho tsykladu pidpriemstva] // *Current economic issues*. № 3. C. 43–49. [in Ukrainian].
12. *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide)–Sixth Edition*, Project Management. ISBN 978-1628251999, 978-1628251845. Project Management Institute – 2017.- p. 756
13. Krykavskyi Ye.V., Chornopyska N.V. (2009). *Logistic systems: [Lohistychni systemy]*. Textbook. Lviv: Publishing House of the National University "Lviv Polytechnic", p. 264. [in Ukrainian].
14. Dmytrieva L.V. (2021). Justification for the application of logistics reengineering of business processes. [Obhruntuvannia zastosuvannia lohistychnoho reinzhynirynhu biznes-protsesiv] // *Theses of the reports of the XVIII International Conference "Project Management in the Development of Society"*, Kyiv, 15 May 2021. P. 143–147. [in Ukrainian].

МАРКЕТИНГ-ОРІЄНТОВАНЕ УПРАВЛІННЯ НАДАННЯМ ФАХОВИХ ОСВІТНІХ ПОСЛУГ

Т.А. Ковтун¹, О.В. Меркт², І.О. Фіногорова³

¹д.т.н., професор, професор кафедри «Управління логістичними системами і проектами»,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-5410-4783

²к.е.н., доцент, доцент кафедри «Управління логістичними системами і проектами»,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0009-0006-1903-590X

³магістр з проєктного менеджменту,
аспірант кафедри «Управління логістичними системами і проектами»
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0001-9409-6135

Анотація

Вступ. Сьогодні конкурентоспроможність економіки країни визначається не лише обсягом природних і виробничих ресурсів, а й інтелектуальним потенціалом її громадян. На жаль, сучасна освіта не завжди відповідає вимогам сьогодення. У зв'язку з цим виникає потреба трансформації підходів до управління освітою, що повинна спрямовуватись на вдосконалення взаємодії учасників ринку освітніх послуг. Сучасна освіта повинна стати гнучкою, адаптивною до потреб споживачів. **Мета статті** полягає у визначенні специфічних особливостей маркетинг-орієнтованого управління наданням фахових освітніх послуг. **Результати.** У статті визначено особливості та структуру фахової освіти, розглянуто характеристики закладу фахової освіти як учасника ринку фахових освітніх послуг, досліджено інструменти маркетинг-орієнтованого управління закладом фахової освіти. **Висновки.** Під маркетингом фахових освітніх послуг слід розуміти управління пропозицією закладу фахової освіти, що орієнтується на вимоги ринку праці, з активним формуванням попиту на сучасні освітні послуги та забезпеченням працевлаштування випускників закладу. Для успішного функціонування закладу фахової освіти необхідний постійний розвиток пропозиції освітніх послуг, удосконалення їх змісту та освоєння нових методів навчання. Завдяки цьому реалізується основна, соціально значуща мета діяльності будь-якого закладу фахової освіти – донести до споживачів освітніх послуг сучасні знання та передовий досвід, які б сприяли інтелектуальному розвитку, загальній та фаховій освіті здобувачів. Практика показує, більшість закладів фахової освіти не відстежує кон'юнктуру попиту на професійні кадри ринку праці, тому відбувається деформація структури трудових ресурсів на споживчому ринку. Виправити ситуацію, що склалася, можливо завдяки використанню маркетингового підходу до управління освітньою діяльністю закладів фахової освіти.

Ключові слова: освітня послуга, фахова освіта, ринок фахових освітніх послуг, маркетинговий підхід.

**MARKETING-ORIENTED MANAGEMENT
OF PROFESSIONAL EDUCATIONAL SERVICES**

T.A. Kovtun¹, O.V. Merkt², I.O. Finohenova³

¹Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department “Logistic Systems and Projects Management”,
Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-5410-4783

²Doctor of philosophy, Associate Professor,
Associate Professor at the Department “Logistic Systems and Projects Management”,
Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine,
ORCID ID: 0009-0006-1903-590X

³Master of Logistics Management,
Postgraduate Student at the Department “Logistic Systems and Projects Management”,
Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0001-9409-6135

Summary

Introduction. Today, the competitiveness of the country's economy is determined not only by the amount of natural and productive resources, but also by the intellectual potential of its citizens. Unfortunately, modern education does not always meet today's requirements. In this regard, there is a need to transform approaches to education management, which should be aimed at improving the interaction of participants in the educational services market. Modern education should become flexible, adaptable to the needs of consumers. **The purpose** of the article is to determine the specific features of marketing-oriented management of the provision of professional educational services. **The results.** The article defines the features and structure of professional education; the characteristics of the vocational education institution as a participant in the market of vocational education services are considered; the tools of marketing-oriented management of a vocational education institution were investigated. **Conclusions.** The marketing of professional educational services should be understood as the management of the offer of a professional education institution, oriented to the requirements of the labor market, with the active formation of demand for modern educational services and ensuring employment of graduates. For the successful functioning of a vocational education institution, it is necessary to constantly develop the offer of educational services, improve their content and master new teaching methods. Thanks to this, the main, socially significant goal of the activity of any vocational education institution is realized – to convey to the consumers of educational services modern knowledge and advanced experience that would contribute to the intellectual development, general and professional education of students. Practice shows that most institutions of professional education do not monitor the demand situation for professional personnel in the labor market, due to which the structure of labor resources in the market is deformed. It is possible to correct the existing situation thanks to the use of a marketing approach to the management of educational activities of vocational education institutions.

Key words: educational service, professional education, market of professional educational services, marketing approach.

Вступ. У сучасному світі освіта є одним з найважливіших чинників економічного та соціального розвитку. Світоглядні принципи особистості, сформовані під впливом отриманих знань та досвіду, є головною рушійною силою еволюції суспільства. Світовий досвід показує, що чим більше уваги приділяється освіті, тим більшого добробуту набувають сучасні та в перспективі майбутні покоління.

У ринкових умовах, що склалися, заклади освіти знаходяться в постійній конкуренції за споживачів на ринку освітніх послуг, що існує в умовах широкого кола пропозицій освітніх послуг та високого рівня конкуренції за споживача між закладами освіти. Щоб вижити в таких умовах, їм постійно необхідно підвищувати якість надаваних послуг та удосконалювати освітній процес, застосовувати нові підходи до освітньої діяльності.

Постановка проблеми. Метою освіти є всебічний розвиток людини як особистості та найвищої цінності суспільства, її талантів, інтелектуальних, творчих і фізичних здібностей, формування цінностей і необхідних для успішної самореалізації компетентностей, виховання відповідальних громадян, які здатні до свідомого суспільного вибору та спрямування своєї діяльності на користь іншим людям і суспільству, збагачення на цій основі інтелектуального, економічного, творчого, культурного потенціалу українського народу, підвищення освітнього рівня громадян задля забезпечення сталого розвитку України та її європейського вибору [1].

Значна кількість освітніх послуг має фахову спрямованість, тобто вони належать до сегменту фахової освіти як здобуття кваліфікації за відповідним напрямом підготовки або спеціальністю, що являє собою цілеспрямований процес навчання наявних (працюючих) і потенційних (здобувачів) працівників професійним знанням та вмінням з метою набуття навичок, необхідних для виконання певних видів завдань у конкретній спеціальності [2].

На жаль, сучасна фахова освіта не завжди відповідає вимогам сьогодення. У зв'язку з цим виникає потреба у трансформації підходів до управління освітою, яке повинно бути спрямованим на вдосконалення взаємодії учасників ринку освітніх послуг. Сучасна фахова освіта повинна стати гнучкою, адаптивною до потреб споживачів. Маркетинг-орієнтоване управління передбачає застосування маркетингового підходу до управління процесом надання фахових освітніх послуг.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Визнання необхідності застосування маркетинг-орієнтованого управління як концепції в сучасних умовах обґрунтовується в роботах закордонних та вітчизняних дослідників. В основу досліджень покладено маркетинговий підхід, що має практичне застосування, представлений в роботах американських вчених Б. Яворські, Е. Колі, Дж. Нарвера, С. Слейтера тощо [3–6].

Застосування маркетингового підходу в управлінні закладами освіти обґрунтовано в роботах таких українських дослідників, як О.М. Перехейда, А.В. Мазур, Т.Є. Оболенська, Л. Калініна, М.О. Люшин, О.Г. Козлова тощо [7–12]. Маркетинг-орієнтоване управління наданням освітніх послуг становить управлінську діяльність закладу освіти, сконцентровану на визначенні потреб та пропозицій на ринку освітніх послуг, що відрізняються від послуг – аналогів конкурентів – або мають виняткові переваги над конкуруючими послугами.

Особливу роль маркетинг-орієнтоване управління відіграє в управлінні закладами фахової освіти. Основними формами здобуття фахової освіти є такі: навчання

у вищих і спеціалізованих навчальних закладах освіти, стажування на курсах підвищення кваліфікації, удосконалення професійної майстерності на виробництві. Крім того, існує багато інших підходів до професійного розвитку, включаючи консультації, тренінги, спільні практики, наставництво (менторство), технічну допомогу тощо. Попри таке різноманіття форм надання фахових послуг, усі вони спрямовані на досягнення основної мети – надання якісної фахової освіти здобувачам, що неможливо зробити без урахування сучасних вимог ринку.

Метою статті є визначення специфічних особливостей маркетинг-орієнтованого управління наданням фахових освітніх послуг. Для досягнення мети були поставлені та вирішені такі завдання:

- 1) визначити особливості та структуру фахової освіти;
- 2) розглянути характеристики закладу фахової освіти як учасника ринку фахових освітніх послуг;
- 3) дослідити інструменти маркетинг-орієнтованого управління закладом фахової освіти.

Виклад основного матеріалу. Учасниками ринку фахових освітніх послуг, що вступають в економічні відносини, є: виробники або постачальники освітніх послуг, споживачі освітніх послуг, посередники, державні та громадські інститути та структури, причетні до просування освітніх послуг на ринку.

У результаті здобуття фахової освіти здобувач опановує певний рівень знань, умінь і навичок з конкретних професій. Професією вважається певний вид трудової діяльності, для здійснення якої необхідно володіти комплексом спеціальних знань, практичних навичок, одержаних шляхом отримання фахової освіти. Отримання професії дає можливість здійснювати професійну діяльність у певній сфері виробництва.

З позицій ринку праці інтерес становлять фахові освітні послуги з першого до третього рівня освіти, що надаються закладами професійної та вищої (в тому числі й післядипломної) освіти. При цьому фахова освіта може надаватись формально та неформально (рис. 1).

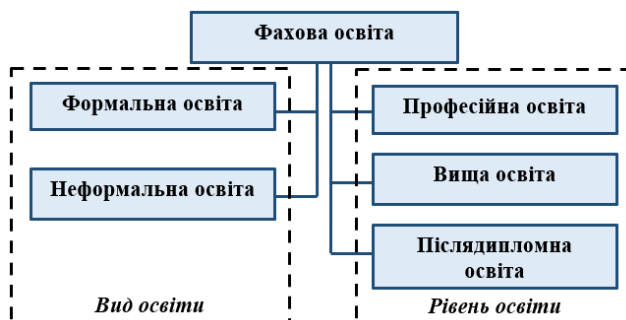


Рис. 1. Структура фахової освіти України

Джерело: власна розробка автора

Основними завданнями маркетингу закладу фахової освіти є:
– виявлення уподобань потенційних споживачів фахової освіти, їх вимог до характеристик освітньої послуги, що надаватиметься, та очікувань від результатів освіти;

– пропозиція та надання фахових освітніх послуг відповідно до потреб ринку праці та вимог споживачів.

Відомо, що маркетинг-мікс будь-якої організації у сфері послуг включає сім основних інструментів (система 7 «Р») [14]. Маркетингові інструменти закладу фахової освіти включають сім груп контрольованих факторів (табл. 1).

Таблиця 1

Інструменти маркетинг-орієнтованого управління закладом фахової освіти

Назва інструменту	Характеристика інструменту
1. Product (продукт)	Фахова освітня послуга становить комплекс дій суб'єкта фахової освітньої діяльності, визначених законодавством, освітньою програмою та/або договором, що мають визначену вартість та спрямовані на досягнення здобувачем фахової освіти очікуваних результатів навчання.
2. Price (ціна)	Ціна на фахову освітню послугу формується залежно від змісту освітньої послуги та складності освітнього процесу і знаходиться під впливом ринку, тобто конкурентів та величини платоспроможного попиту.
3. Promotion (просування)	До форм просування фахових освітніх послуг на ринок належать усі форми реклами, паблік рілейшнз, прямий маркетинг тощо.
4. Place (розподіл, збут)	Надання фахових освітніх послуг здійснюється закладами фахової освіти – юридичними особами публічного чи приватного права, основним видом діяльності яких є фахова освітня діяльність. Форма надання послуг може бути як off-line, так і on-line. На ринку фахових освітніх послуг існують посередники, до завдань яких належить просування фахових освітніх послуг.
5. People (працівники)	Викладачами у закладі фахової освіти повинні бути висококваліфіковані педагогічні та науково-педагогічні працівники, діяльність яких спрямована на формування компетенцій здобувачів фахової освіти.
6. Process (процес надання послуги)	Фахова освітня діяльність спрямована на організацію, забезпечення та реалізацію освітнього процесу – системи науково-методичних і педагогічних заходів, спрямованих на розвиток особистості шляхом формування та застосування її компетентностей. Фахова освітня діяльність повинна відповідати стандартам якості як за формою, так і за змістом.
7. Physical evidence (матеріальні докази)	Фахова освітня послуга здійснюється на основі освітньої програми – єдиного комплексу освітніх компонентів (предметів вивчення, дисциплін, індивідуальних завдань, контрольних заходів тощо), спланованих і організованих для досягнення визначених результатів навчання. У результаті навчання формується фахівець, який володіє знаннями, уміннями, навичками, способами мислення, поглядами, цінностями та іншими особистісними якостями, набутими у процесі навчання, виховання та розвитку, які можна ідентифікувати, спланувати, оцінити і виміряти та які особа здатна продемонструвати після завершення освітньої програми або окремих освітніх компонентів. Матеріальними доказами отримання фахової освіти є диплом фахівця, сертифікат, що отримують здобувачі освіти залежно від виду (формальна, неформальна) фахової освіти.

Джерело: власна розробка автора

Головною метою маркетингу фахової освіти є забезпеченість задоволеності споживача освітньої послуги, яка можлива лише завдяки оцінці результату освіти, що може бути внутрішньою та зовнішньою. Внутрішня оцінка якості отриманої освіти здійснюється за місцем отримання освіти педагогічними працівниками та показує ступінь оволодіння певними компетенціями здобувачем у ході освітнього процесу. Підтвердженням засвоєння компонентів освітньої програми та отримання необхідних результатів навчання є отримана здобувачем оцінка відповідно до наявних шкал оцінювання знань. Крім прямої внутрішньої оцінки освіти, є ще непряма зовнішня оцінка, яка виражається відповідно до компетентності випускника закладу фахової освіти щодо вимог ринку праці до освіти потенційних претендентів на вакансії певних фахівців.

Висновки

Таким чином, під маркетингом фахових освітніх послуг слід розуміти управління пропозицією закладу фахової освіти, що орієнтується на вимоги ринку праці, з активним формуванням попиту на сучасні освітні послуги та забезпеченням працевлаштування випускників закладу.

Для успішного функціонування закладу фахової освіти необхідний постійний розвиток пропозиції освітніх послуг, удосконалення їх змісту та освоєння нових методів навчання. Завдяки цьому реалізується основна, соціально значуща мета будь-якого закладу фахової освіти – донести до споживачів освітніх послуг сучасні знання та передовий досвід, які б сприяли інтелектуальному розвитку, загальній та фаховій освіті здобувачів.

Практика показує, що більшість закладів фахової освіти не відстежує кон'юнктуру попиту на професійні кадри ринку праці, тому і відбувається деформація структури трудових ресурсів на ринку. Виправити ситуацію, що склалася, можливо завдяки використанню маркетингового підходу до управління освітньою діяльністю закладів фахової освіти.

ЛІТЕРАТУРА

1. Про освіту : Закон України від 5 вересня 2017 р. № 2145-VIII / *Верховна Рада України. Відомості Верховної Ради (ВВР)*. 2017. № 38–39. Ст. 380. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2145-19#Text>.
2. Speck M., Knipe C. Why can't we get it right? Designing high-quality professional development for standards-based schools (2nd ed.). Thousand Oaks : Corwin Press, 2005. 184 с. URL: <https://eric.ed.gov/?id=ED495574/>.
3. Jaworski B.J., Kohli A.K. Market Orientation: Antecedents and Consequences. *Journal of Marketing*. 1993. Vol. 57. № 3. P. 53–70. <https://doi.org/10.2307/1251854>.
4. Kohli A.K., Jaworski B.J. Market Orientation: The Construct, Research Propositions and Managerial Implications. *Journal of Marketing*. 1990. Vol. 54. № 2. P. 1–18. URL: <https://people.duke.edu/~moorman/Marketing-Strategy-Seminar-2015/Session%202/Jaworski%20and%20Kohli.pdf>.
5. Narver J.C., Slater S.F., MacLachlan D.L. Responsive and Proactive Market Orientation and New-Product Success. *Journal of Product Innovation*

- Management*. 2004. № 21. P. 334–347. <http://dx.doi.org/10.1111/j.0737-6782.2004.00086.x>.
6. Narver J. C., Slater S.F. The Effect of a Market Orientation on Business Profitability. *Journal of Marketing*. 1990. Vol. 54. № 4. P. 20–35. <http://dx.doi.org/10.2307/1251757>
 7. Перехейда О.М. Платні освітні послуги. *Завучу. Усе для роботи*. 2017. № 9/10. С. 16–27.
 8. Мазур А.В. Інструменти позиціонування навчального закладу на ринку освітніх послуг. *Управління школою*. 2012. № 19/21. С. 45–49.
 9. Оболенська Т.Є. Маркетинг освітніх послуг: вітчизняний і зарубіжний досвід : монографія. Київ : КНЕУ, 2001. 208 с.
 10. Калініна Л. Управління Новою українською школою. Порівняльна характеристика концептуальних змін. *Директор школи*. 2017. № 1/2. С. 12–21.
 11. Люшин М.О. Маркетинговий підхід до управління сучасним закладом загальної середньої освіти. *Вісник Черкаського національного університету імені Богдана Хмельницького. Серія «Педагогічні науки»*. 2018. № 3. С. 22–29. URL: <https://ped-ejournal.cdu.edu.ua/article/view/2913>.
 12. Козлова О.Г., Козлов Д.О., Молчанова К.В. Інноваційні основи маркетингової діяльності сучасного керівника професійно-технічного навчального закладу. Самореалізація пізнавально-творчого і професійного потенціалу особистості в інноваційній освіті : монографія / за ред. проф. М.О. Лазарева. Суми : ФОП «Цьома С.П.», 2016. С. 171–188.
 13. Концепція маркетинг-мікс. URL: <https://www.bmb.com.ua/2021/02/4p-5p-7p.html>.

REFERENCES

1. Law of Ukraine “On Education” [Zakon Ukrainy “Pro Osvitu”]. (2017). *Vedomosti Verkhovna Rada (VVR)*. 38–39. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2145-19#Text>. [in Ukraine].
2. Speck, M., Knipe, C. (2005). Why can’t we get it right? Designing high-quality professional development for standards-based schools (2nd ed.). *Thousand Oaks: Corwin Press*. 184. <https://eric.ed.gov/?id=ED495574>
3. Jaworski, B.J., Kohli, A.K. (1993). Market Orientation: Antecedents and Consequences. *Journal of Marketing*. Vol. 57, 3, 53–70. <https://doi.org/10.2307/1251854>
4. Kohli, A.K., Jaworski, B.J. (1990). Market Orientation: The Construct, Research Propositions and Managerial Implications. *Journal of Marketing*. Vol. 54, 2, 1–18. <https://people.duke.edu/~moorman/Marketing-Strategy-Seminar-2015/Session%202/Jaworski%20and%20Kohli.pdf>.
5. Narver, J.C., Slater, S.F., MacLachlan, D.L. (2004). Responsive and Proactive Market Orientation and New-Product Success. *Journal of Product Innovation Management*, 21, 334–347. <http://dx.doi.org/10.1111/j.0737-6782.2004.00086.x>.

6. Narver, J.C., Slater, S. F. (1990). The Effect of a Market Orientation on Business Profitability. *Journal of Marketing*. Vol. 54, 4, 20–35. <http://dx.doi.org/10.2307/1251757>.
7. Pereheida, O.M. (2017). Paid educational services [Platni osvritni posluhy]. *Head teacher Everything for work*, 9/10, 16–27. [in Ukraine].
8. Mazur, A.V. (2012). Tools for positioning an educational institution on the market of educational services [Instrumenty pozytsionuvannia navchalnoho zakladu na rynku osvritnikh posluh]. *School management*, 19/21, 45–49. [in Ukraine].
9. Obolenska, T.E. (2001). Marketing of educational services: domestic and foreign experience [Marketynh osvritnikh posluh: vitchyzniani i zarubizhnyi dosvid]: monograph. *Kyiv: KNEU*. 208. [in Ukraine].
10. Kalinina, L. (2017). Management of the New Ukrainian School. Comparative characteristics of conceptual changes [Upravlinnia Novoiu ukrainskoiu shkoloiu. Porivnialna kharakterystyka kontseptualnykh zmin]. *School Director*, 1/2, 12–21. [in Ukraine].
11. Lyushin, M.O. (2018). Marketing approach to management of a modern institution of general secondary education [Marketynhovyi pidkhyd do upravlinnia suchasnym zakladom zahalnoi serednoi osvity]. *Bulletin of the Cherkasy National University named after Bohdan Khmelnytskyi. Series "Pedagogical Sciences"*. 3. 22–29. <https://ped-ejournal.cdu.edu.ua/article/view/2913> [in Ukraine].
12. Kozlova, O.G., Kozlov, D.O., Molchanova, K.V. (2016). Innovative basics of marketing activity of a modern head of a vocational educational institution. Self-realization of the cognitive-creative and professional potential of the individual in innovative education [Innovatsiini osnovy marketynhovoii diialnosti suchasnoho kerivnyka profesiino-tekhnichnoho navchalnoho zakladu. Samorealizatsiia piznavalno-tvorchoho i profesiinoho potentsialu osobystosti v innovatsiinii osviti]: monograph / edited by Prof. M. O. Lazarev. *Sumy: FOP Tsyoma S. P.*, 171–188. [in Ukraine].
13. Concept of marketing mix [Kontseptsiia marketynh-miks]. <https://www.bmb.com.ua/2021/02/4p-5p-7p.html> [in Ukraine].

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 629.45

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2024.1-20.04>

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЕРТИКАЛЬНОЇ ДИНАМІКИ ВАГОНА-ПЛАТФОРМИ, ЗАВАНТАЖЕНОГО З'ЄМНИМИ МОДУЛЯМИ ПРИ РУСІ СТИКОВОЮ НЕРІВНІСТЮ

А.О. Ловська¹, А.О. Мурад'ян², О.В. Демидюков³

¹д.т.н., професор, професор кафедри інженерії вагонів та якості продукції
Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна
ORCID ID: 0000-0002-8604-1764

²к.т.н., доцент,
доцент кафедри «Експлуатація портів і технологія вантажних робіт»,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна
ORCID ID: 0000-0002-6488-6627

³аспірант кафедри «Експлуатація портів і технологія вантажних робіт»,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-4791-3830

Анотація

Вступ. Перспективи експлуатації залізничного транспорту диктують необхідність введення інновацій для підвищення ефективності його використання. Рівень поповнення вагонного парку за останні роки є незначним. У зв'язку з цим для забезпечення безперервного перевізного процесу доцільною є ситуаційна адаптація наявного парку вагонів до перевезень завданої номенклатури вантажів. Оскільки одним із найбільш затребуваних типів вагонів у міжнародному сполученні є вагони-платформи, то важливим є проведення ситуаційної адаптації їх несучих конструкцій до таких перевезень.

Мета. Метою дослідження є висвітлення результатів моделювання вертикальної динаміки вагона-платформи, завантаженого з'ємними модулями, що рухається стиковою нерівністю.

Результати. Для розширення номенклатури вантажів, які перевозяться на довгобазних вагонах-платформах, пропонується використання з'ємного модуля. Вантажний майданчик з'ємного модуля утворений сендвіч-панелями, що складаються з двох металевих листів, між якими знаходиться енергопоглинаючий матеріал. Однак наявність енергопоглинаючого матеріалу в сендвіч-панелі буде впливати на навантаженість несучої конструкції вагона-платформи. У зв'язку з цим проведено дослідження динаміки вагона-платформи, завантаженого з'ємними модулями, у вертикальній площині. Встановлено, що максимальне вертикальне прискорення, яке діє на вагон-платформу в центрі маси, складає $2,72 \text{ м/с}^2$. Дана величина прискорення майже на 5% нижча за ту, що діє на вагон-платформу з урахуванням типової схеми сприйняття навантажень від вантажу. Рух вагона-платформи у завантаженому стані оцінюється як «відмінний».

Висновки. Проведені дослідження сприятимуть створенню рекомендацій щодо підвищення ефективності експлуатації вагонів-платформ шляхом їх ситуативної адаптації до перевезень різної номенклатури вантажів.

Ключові слова: залізничний транспорт, ситуативна адаптація вагона, з'ємний модуль, динаміка вагона-платформи.

RESEARCH OF THE VERTICAL DYNAMICS OF A PLATFORM WAGON LOADED BY REMOVABLE MODULES WHEN RUNNING OVER A RAIL JOINT

A.O. Lovska¹, A.O. Muradian², O.V. Demydiakov³

¹Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Wagon Engineering and Product Quality
Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-8604-1764>

²PhD, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Port Operation and Cargo Handling Technology
Odessa National Maritime University, Odesa, Ukraine
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6488-6627>

³Postgraduate Student at the Department of Port Operation and Cargo Handling Technology
Odessa National Maritime University, Odesa, Ukraine
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4791-3830>

Summary

Introduction. The prospects for railway transport operation dictate the need to create new solutions to improve the efficiency of its use. The level of replenishment of the railway vehicles fleet has been insignificant in recent years, and therefore, to ensure an uninterrupted transportation process, it is advisable to adapt the existing fleet of railway vehicles to transportation of the specified range of goods. Since platform wagons are one of the most popular types of wagons in international transport, it is important to adapt their load-bearing structures to such transportation.

Purpose. The paper presents the results of modelling the vertical dynamics of a platform wagon loaded by removable modules when running through a rail joint.

Results. To expand the range of transported goods on a long-base platform wagon, it is proposed to use a removable module. The cargo area of the detachable module is formed by sandwich panels consisting two metal sheets with energy-absorbing material between them. However, the presence of energy-absorbing material in the sandwich panel will have an impact on the load on the load-bearing structure of the platform wagon. In this regard, the dynamics of a platform wagon loaded by removable modules in the vertical plane was studied. It is established that the maximum acceleration acting on the platform wagon in the centre of gravity is of 2.72 m/s². This acceleration value is almost 5% lower than the acceleration acting on the platform wagon, taking into account the typical pattern of the load perception from the goods. The movement of the platform wagon when it is running in a loaded state is assessed as "excellent".

Conclusions. The conducted research will contribute to the development of recommendations for improving the efficiency of platform wagons through their situational adaptation to the transport of various types of goods.

Key words: railway transport, situational adaptation of a wagon, removable module, dynamics of a platform wagon.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Відомо, що провідною складовою частиною транспортної галузі вже давно є залізничний транспорт. Важливо сказати, що він забезпечує потреби не тільки внутрішньої економіки країни, але і зовнішні, тобто в міжнародному сполученні. При цьому одними із найбільш поширених типів вагонів, які використовуються у міжнародному сполученні, є вагони-платформи. Водночас експлуатація вагонів-платформ у міжнародному сполученні стримується їх нестачею. Поповнення вагонного парку вагонів-платформ вимагає додаткових капітальних вкладень. Більш раціональним варіантом є ситуаційна адаптація наявного парку вагонів до перевезень конкретних типів вантажів, в тому числі й стратегічних. Таке рішення дозволить підвищити ефективність перевізного процесу, а також сприятиме економії капітальних витрат на закупівлю нових вагонів, тому питання ситуаційної адаптації наявного парку вагонів-платформ до перевезень завданої номенклатури вантажів є досить актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання цієї проблеми, і виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Дослідження, присвячені питанням створення та удосконалення несучих конструкцій вагонів-платформ для підвищення ефективності їх експлуатації, висвітлюються в багатьох публікаціях.

Для ситуаційної адаптації вагона-платформи до перевезень довгомірних вантажів у роботі [1] запропоновано використання спеціального з'ємного модуля. Кріплення модуля на вагоні-платформі передбачається з використанням фітингових упорів. Наведено відповідне наукове обґрунтування конструкційного виконання з'ємного модуля. Але дана конструкція з'ємного модуля передбачає використання пружно-фрикційних зв'язків у рамі. Таке рішення ускладнює процес технічного обслуговування та ремонту вагона.

Подібне рішення запропоновано і в публікації [2]. При цьому для ситуаційної адаптації вагона-платформи до перевезення різнотипних вантажів пропонується використання з'ємного модуля типу FLAT RACK. Особливістю модуля є наявність пружно-в'язких зв'язків у фітингах, що сприяє зменшенню повздовжніх навантажень, які діють на нього в експлуатації. Авторами наведено відповідне теоретичне обґрунтування запропонованої конструкції з'ємного модуля. Однак нині використовуються довгобазні конструкції вагонів-платформ зі спеціальними надбудовами для розміщення фітингових упорів. Ці надбудови використовуються у зв'язку з тим, що рама вагона-платформи має форму бруса, рівного опору згину. У зв'язку з цим рама має змінну висоту профілів її виконання за довжиною. Відповідно, використання такого з'ємного модуля на подібних вагонах-платформах є неможливим.

Особливості розрахунку на міцність удосконаленої рами вагона-платформи висвітлюються в роботі [3]. При цьому застосовано метод скінченних елементів. Авторами визначено поля розподілень максимальних еквівалентних напружень в несучій конструкції вагона-платформи. Отримані напруження знаходяться в межах допустимих значень, що підтверджує доцільність конструкційних рішень щодо їх виконання. Однак авторами не запропоновано заходів щодо ситуаційної адаптації даного вагона до перевезень різнотипних вантажів, що підвищило б ефективність його експлуатації.

Дослідження міцності несучої конструкції довгобазного вагона-платформи проводилось у в роботі [4]. Особливість даної конструкції вагона-платформи полягає у відсутності хребтової балки за довжиною рами. Для обґрунтування такого рішення авторами проведено не тільки теоретичні дослідження її навантаженості, а й експериментальні. Отримані результати свідчать про можливість експлуатації вагона на магістральних коліях. Однак конструкція такого вагона-платформи не забезпечує можливості її застосування для перевезень широкої номенклатури вантажів, що звужує спектр її використання.

У роботі [5] проводиться розрахунок міцності довгобазного вагона-платформи для перевезень контейнерів. При цьому авторами використано класичні методи опору матеріалів для визначення згинальних моментів, які виникають у перерізах несучої конструкції вагона-платформи. На наступному етапі проводилося визначення міцності з використанням методу скінчених елементів. Важливо сказати, що конструкція даного типу вагона зорієнтована на перевезення конкретного типу вантажу. Це обмежує її затребуваність в експлуатації.

Дослідження міцності несучої конструкції вагона-платформи залежно від величини її деформацій проводилося у статті [6]. Важливо підкреслити, що дані дослідження проводилися із застосуванням експериментальних методів, зокрема електричного тензометрування. Результати даних досліджень дозволили визначити найбільш навантажені складові частини конструкції вагона-платформи. Однак автори не запропонували рішень щодо покращення міцності несучої конструкції вагона-платформи шляхом її удосконалення.

Проведений аналіз наукових публікацій [1–6] свідчить про те, що питання удосконалення несучих конструкцій вагонів-платформ є досить актуальним. Однак для підвищення ефективності їх експлуатації потребують вирішення питання ситуаційної адаптації до перевезень різної номенклатури вантажів, тому дослідження, присвячені ситуаційній адаптації вагонів-платформ до перевезень розширеної номенклатури вантажів, є досить актуальними.

Формулювання мети статті, постановка завдання. Мета статті – висвітлення результатів моделювання вертикальної динаміки вагона-платформи, завантаженого з'ємними модулями, при русі стиковою нерівністю. Для досягнення зазначеної мети поставлені такі завдання:

- 1) сформулювати розрахункову схему для визначення вертикального прискорення, яке діє на несучу конструкцію вагона-платформи, завантаженого з'ємними модулями;
- 2) провести математичне моделювання вертикальної динаміки вагона-платформи, завантаженого з'ємними модулями.

Об'єктом дослідження є довгобазний вагон-платформа моделі 13-7024.

Предмет дослідження – динамічна навантаженість несучої конструкції вагона-платформи.

Виклад матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Для розширення номенклатури вантажів, що перевозяться на довгобазній конструкції вагона-платформи, пропонується використання з'ємного модуля (рис. 1).

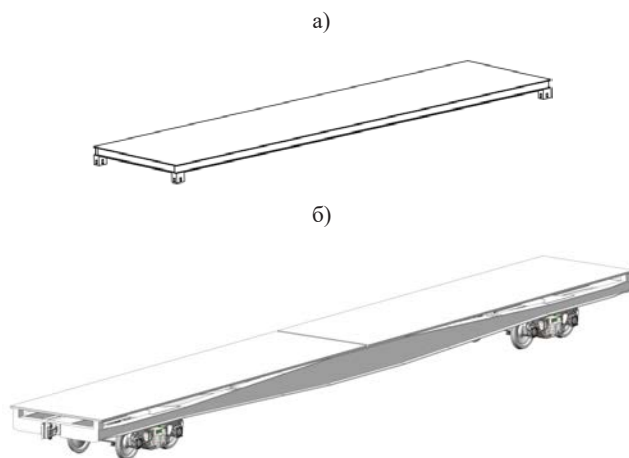


Рис. 1. З'ємний модуль: а) загальний вигляд; б) розміщення на вагоні-платформі

Особливістю такого з'ємного модуля є те, що він являє собою рамну конструкцію, перекриту зверху металевим листом. У кутових частинах з'ємного модуля встановлено фітингові упори. При цьому висота упорів з боку консольної частина вагона-платформи є вищою, ніж з протилежного боку. Таке рішення дозволяє утворити прямолінійну горизонтальну площину для розміщення вантажу.

Для забезпечення схоронності вантажу, який перевозиться, вантажний майданчик з'ємного модуля утворений сендвіч-панелями [7] (рис. 2). Кожна з таких панелей складається з металевих листів, між якими знаходиться матеріал з енергопоглинаючими властивостями.

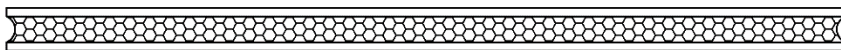


Рис. 2. Поперечний переріз сендвіч-панелі

Треба сказати, що наявність енергопоглинаючого матеріалу в сендвіч-панелях впливає на навантаженість несучої конструкції вагона-платформи. У зв'язку з цим необхідно дослідити динаміку вагона-платформи, завантаженого з'ємними модулями у вертикальній площині. Для цього було проведене математичне моделювання.

Враховано, що два з'ємних модулі розміщуються на вагоні-платформі, який рухається стиковою нерівністю. При цьому з'ємні модулі завантажені умовним вантажем з використанням їх повної вантажопідйомності. Динамічна система утворена чотирма тілами – несучою конструкцією вагона-платформи, на якому розміщуються два з'ємних модулі з вантажем, а також два візки. Розрахункову схему наведено на рис. 3.

Прийнято припущення, що вагон-платформа переміщується стиковою нерівністю колії, яка має пружно-дисипативні властивості. Реакції колії пропорційні як її деформаціям, так і швидкостям цих деформацій. При проведенні розрахунків враховано, що несуча конструкція вагона-платформи спирається на візки моделі 18–100. Враховано, що енергопоглинаючий матеріал сендвіч-панелі має пружно-фрикційні властивості.

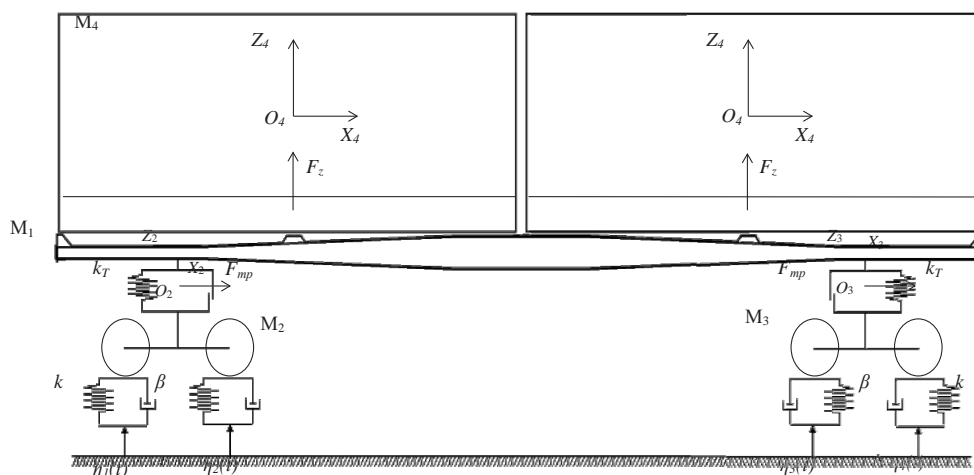


Рис. 3. Розрахункова схема вагона-платформи зі з'ємними модулями

Отже, система диференціальних рівнянь руху вагона-платформи має такий вигляд:

$$\begin{cases} M_1 \cdot \ddot{q}_1 + C_{1,1} \cdot \dot{q}_1 + C_{1,2} \cdot \dot{q}_2 + C_{1,3} \cdot \dot{q}_3 = -F_{TP} \cdot (\text{sign}(\dot{\delta}_1) + \text{sign}(\dot{\delta}_2)) - F_z, \\ M_2 \cdot \ddot{q}_2 + C_{2,1} \cdot \dot{q}_1 + C_{2,2} \cdot \dot{q}_2 + B_{2,2} \cdot \dot{q}_2 = F_{TP} \cdot \text{sign}(\dot{\delta}_1) + k(\eta_1 + \eta_2) + \beta(\dot{\eta}_1 + \dot{\eta}_2), \\ M_3 \cdot \ddot{q}_3 + C_{3,1} \cdot \dot{q}_1 + C_{3,3} \cdot \dot{q}_3 + B_{3,3} \cdot \dot{q}_3 = F_{TP} \cdot \text{sign}(\dot{\delta}_2) + k(\eta_3 + \eta_4) + \beta(\dot{\eta}_3 + \dot{\eta}_4), \\ M_4 \cdot \ddot{q}_4 = F_z - M_4 \cdot g - F_{TP}^k \cdot (\text{sign}(\dot{q}_1) + \text{sign}(\dot{q}_4)), \end{cases} \quad (1)$$

$$F_z = -k'_k(y_1 - y_4), \quad (2)$$

де M_1 – маса несучої конструкції вагона-платформи; M_2, M_3 – маса, відповідно, першого та другого візка; M_4 – маса з'ємного модуля; C_{ij} – характеристики пружності елементів коливальної системи, які визначаються значеннями коефіцієнтів жорсткості пружин k_T ; B_{ij} – функція розсіювання; k – жорсткість колії; β – коефіцієнт демпфування; F_{TP} – сила тертя у ресорному комплекті візка; δ_i – деформації пружних елементів ресорного підвішування; $\eta_i(t)$ – нерівність колії; k_k – жорсткість енергопоглинаючого матеріалу сендвіч-панелі; F_{TP}^k – сила тертя, яка виникає в сендвіч-панелі.

Вхідними параметрами моделі є технічні характеристики несучої конструкції вагона-платформи, ресорного підвішування, з'ємного модуля, а також збурюючої дії.

Розв'язок системи диференціальних рівнянь руху (1) здійснено в програмному комплексі MathCad [8; 9]. Вектор початкових умов має такий вигляд: початкове переміщення несучої конструкції з вантажем становить 0,004 м, швидкість становить 0; для візків, відповідно, 0,003 м та 0 [10].

Отримані результати розрахунку наведені на рис. 4.

Отже, максимальне вертикальне прискорення, яке діє на вагон-платформу в центрі мас, склало 2,72 м/с². Отримана величина прискорення майже на 5% нижча за ту, що діє на вагон-платформу з урахуванням типової схеми сприйняття

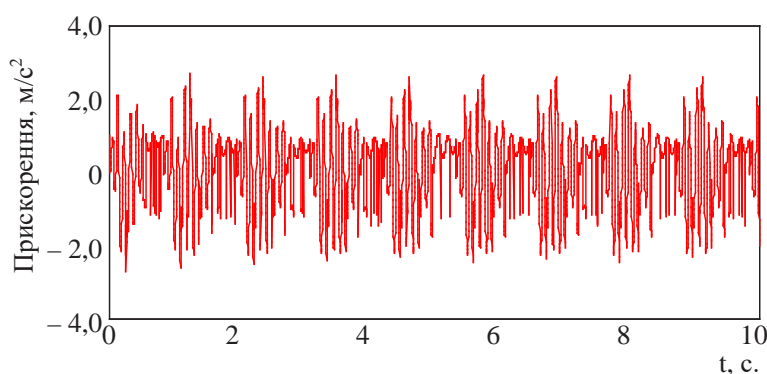


Рис. 4. Вертикальні прискорення несучої конструкції вагона-платформи

навантажень від вантажу. При цьому рух вагона-платформи у завантаженому стані оцінюється як «відмінний» [11].

Висновки і перспектива подальшої роботи в цьому напрямі.

1. Сформовано розрахункову схему для визначення вертикального прискорення, яке діє на несучу конструкцію вагона-платформи, завантаженого з'ємними модулями. При цьому враховано, що два з'ємних модулі розміщуються на вагоні-платформі, який рухається стиковою нерівністю. З'ємні модулі завантажені умовним вантажем з використанням їх повної вантажопідйомності. Динамічна система утворена чотирма тілами. Це несуча конструкція вагона-платформи, на якому розміщуються два з'ємних модулі з вантажем, а також два візки. До уваги прийнято випадок руху вагона-платформи стиковою нерівністю колії, яка має пружно-дисипативні властивості.

2. Проведено математичне моделювання вертикальної динаміки вагона-платформи, завантаженого з'ємними модулями. Максимальне прискорення, яке діє на вагон-платформу в центрі мас, склало $2,72 \text{ м/с}^2$. Дана величина прискорення майже на 5% нижча за ту, що діє на вагон-платформу з урахуванням типової схеми сприйняття навантажень від вантажу. Це пояснюється використанням сендвіч-панелей з енергопоглинаючим матеріалом як проміжного адаптера між вантажем та рамою вагона-платформи. Рух вагона-платформи у завантаженому стані оцінюється як «відмінний».

Перспективою дослідження є комп'ютерне моделювання вертикальної навантаженості несучої конструкції вагона-платформи під час руху стиковою нерівністю. Це дозволить визначити поля розподілення прискорень відносно його несучої конструкції, а також верифікувати запропоновану математичну модель.

Проведені дослідження сприятимуть створенню рекомендацій щодо підвищення ефективності експлуатації вагонів-платформ шляхом їх ситуаційної адаптації до перевезень вантажів різної номенклатури.

ЛІТЕРАТУРА

1. Determining patterns of vertical load on the prototype of a removable module for long-size cargoes / G. Vatulia, A. Lovska, M. Pavliuchenkov, V. Nerubatskyi, A. Okorokov, D. Hordiienko, R. Vernigora, I. Zhuravel. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. № 6/7 (120). P. 21–29. doi:10.15587/1729-4061.2022.266855.
2. The Analysis of the Loading and the Strength of the FLAT RACK Removable Module with Viscoelastic Bonds in the Fittings / S. Panchenko, J. Gerlici, G. Vatulia, A. Lovska, M. Pavliuchenkov, K. Kravchenko. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13(1), 79. doi:10.3390/app13010079
3. Design, analysis and prototype development of railway wagons on different loading conditions / N. Shivendra, T. Rishikesh, K. Satyaajeet, A. Javed, M. Maniraj. *Preprint*. 2020. March.
4. Comparative analysis of the results of theoretical and experimental studies of freight wagon Sdggmrss-twin / V. Stoilov, G. Simić, S. Purgić, D. Milković, S. Slavchev, S. Radulović, V. Maznichki. *IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 664. 012026. doi:10.1088/1757-899X/664/1/012026.
5. Кельріх М.Б., Федосов-Ніконов Д.В. Дослідження на міцність конструкції довгобазної платформи. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2016. № 1 (225). С. 90–94.
6. Das Apurba, Agarwal Gopal. Investigation of Torsional Stability and Camber Test on a Meter Gauge Flat Wagon. *Computer Science*. 2020. MARTCH. doi:10.1007/978-981-15-0772-4_24.
7. Моделювання поперечної навантаженості контейнера зі стінами із сендвіч-панелей, розміщеного на вагоні-платформі / Г.Л. Ватуля, А.О. Ловська, Є.С. Краснокутський, С.В. Дериземля. *Розвиток транспорту*. 2023. № 3 (18). С. 50–58. doi:10.33082/td.2023.3-18.04.
8. Богач І.В., Краковецький О.Ю., Килик Л.В. Чисельні методи розв'язання диференціальних рівнянь засобами MathCad : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2020. 106 с.
9. Методи рішення математичних задач у середовищі Mathcad : навчальний посібник / О.В. Соболенко, Л.М. Петречук, Ю.С. Іващенко, Є.Є. Єгорцева. Дніпро : НМетАУ, 2020. 60 с.
10. Дьомін Ю.В., Черняк Г.Ю. Основи динаміки вагонів. Київ : КУЕТТ, 2003. 269 с.
11. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). Київ, 2015. 250 с.

REFERENCES

1. Glib Vatulia, Alyona Lovska, Mykhailo Pavliuchenkov, Volodymyr Nerubatskyi, Andrii Okorokov, Denys Hordiienko, Roman Vernigora & Irina Zhuravel. (2022). Determining patterns of vertical load on the prototype of a removable module for long-size cargoes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6/7 (120), 21–29. doi:10.15587/1729-4061.2022.266855.

2. Sergii Panchenko, Juraj Gerlici, Glib Vatulia, Alyona Lovska, Mykhailo Pavliuchenkov & Kateryna Kravchenko. (2023). The Analysis of the Loading and the Strength of the FLAT RACK Removable Module with Viscoelastic Bonds in the Fittings. *Applied Sciences*, 13(1), 79. doi:10.3390/app13010079.
3. Nandan Shivendra, Trivedi Rishikesh, Kant Satyajeet, Ahmad Javed & Maniraj M. (2020). Design, analysis and prototype development of railway wagons on different loading conditions. *Preprint*. March.
4. Stoilov, V., Simić, G., Purgić, S., Milković, D., Slavchev, S., Radulović S. & Maznichki V. (2019). Comparative analysis of the results of theoretical and experimental studies of freight wagon Sdggmrss-twin. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 664, 012026. doi:10.1088/1757-899X/664/1/012026.
5. Kelrikh, M.B. & Fedosov-Nikonov D.V. (2016). Research on the structural strength of a long-wheelbase platform [Doslidzhennia na mitsnist konstruktzii dovhobaznoi platformy]. *Visnyk Skhidnoukrainskoho Natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia*, 1 (225), 90–94. [in Ukrainian]
6. Das Apurba & Agarwal Gopal. (2020). Investigation of Torsional Stability and Camber Test on a Meter Gauge Flat Wagon. *Computer Science. MARTCH*. doi:10.1007/978-981-15-0772-4_24.
7. Vatulia, G.L., Lovska, A.O., Krasnokutskyi, Ye.S. & Deryzemlia, S.V. (2023). Modeling of the transversal loading of a container with sandwich panels walls placed on a platform car [Modeliuvannia poperechnoi navantazhenosti konteineru zi stinamy iz sendvich-panelei, rozmishchenoho na vahoni-platformi]. *Transport development*, 3(18), 50–58. doi: 10.33082/td.2023.3-18.04 [in Ukrainian].
8. Bohach, I.V., Krakovetskyi, O.Yu. & Kylyk, L.V. (2020). Numerical methods for solving differential equations using MathCad: Tutorial [Chyselni metody rozviazannia dyferentsialnykh rivnian zasobamy MathCad: Navchalnyi posibnyk]. Vinnytsia: VNTU. 106 p. [in Ukrainian].
9. Sobolenko, O.V., Petrechuk, L.M., Ivashchenko, Yu.S. & Yehortseva, Ye.Ye. (2020). Methods for solving mathematical problems in the Mathcad environment: The first collection in the discipline “Informatics and Systemology”. [Metody rishennia matematychnykh zadach u seredovyschi Mathcad: Navchalnyi posibnyk z dystsypliny “Informatyka i systemolohiia”]. Dnipro: NMetAU. 60 p. [in Ukrainian].
10. Domin, Yu.V. & Chernyak, G.Yu. (2003). Basics of wagons dynamics. [Osnovi dinamiki vagoniv]. Kyiv: KUETT. 269 p. [in Ukrainian]
11. DSTU 7598:2014. Freight wagons. General requirements for calculations and design of new and modernized 1520 mm gauge wagons (non-self-propelled) [Vahony vantazhni. Zahalni vymohy do rozrakhunkiv ta proiektuvannia novykh i modernizovanykh vahoniv kolii 1520 mm (nesamokhidnykh)]. (2015) Kyiv. 2015. 250 p. [in Ukrainian].

МОРСЬКИЙ ТА ВНУТРІШНІЙ ВОДНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 621.436:629.128.6

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2024.1-20.05>

ОГЛЯД СУЧАСНИХ ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ СИСТЕМ ДІАГНОСТИКИ СУДНОВИХ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ ПО ПАРАМЕТРАМ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ

В.І. Залож

к.т.н., доцент, доцент кафедри інженерних дисциплін,
Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія»,
Ізмаїл, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-5213-6896

Анотація

Вступ. У роботі розглядаються сучасні виклики та розвиток систем діагностики суднових дизельних двигунів за параметрами робочого процесу в морській індустрії. У контексті зростання вимог до ефективності, надійності та безпеки суднових дизельних двигунів акцентується увага на необхідності впровадження передових технологій діагностики дизелів за параметрами робочого процесу, тобто систем, які працюють в режимі реального часу. Такі системи забезпечують оперативне виявлення змін у робочих параметрах дизельних двигунів, дозволяючи операторам швидко ідентифікувати потенційні несправності та реагувати на них. **Метою роботи** є огляд наявних систем діагностики дизелів за параметрами робочого процесу в морській індустрії, аналіз їх переваг та недоліків, а також визначення основних напрямів удосконалення в цій галузі, адже діагностика та подальше вдосконалення характеристик робочого процесу двигуна є одним із варіантів вирішення ефективності силової установки, що виступає основою для забезпечення надійності та довговічності обладнання. На основі аналізу індикаторних діаграм тиску газів у робочих циліндрах здійснюється вибір оптимального навантажувального режиму експлуатації та діагностика двигуна. Цей підхід дозволяє точно визначити параметри робочого процесу та виявити будь-які аномалії, що можуть призвести до неполадок. Це сприяє підвищенню ефективності використання палива, зниженню шкідливих викидів у навколишнє середовище та продовженню терміну служби суднових двигунів. **Аналізуючи** як історичні, так і сучасні системи діагностики суднових дизелів за параметрами робочого процесу, автор охоплює широкий спектр підходів до параметричної діагностики та оптимізації робочого процесу дизелів. Завдяки високій точності та актуальності отриманої інформації системи реального часу сприяють ефективній діагностиці робочого процесу та управлінню станом двигуна під час експлуатації. Також розглядаються та порівнюються деякі стаціонарні системи діагностики дизелів за параметрами робочого процесу, які є ефективними, але мають свої обмеження. **Таким чином**, незважаючи на широке застосування стаціонарних систем діагностики реального

часу, нагальною залишається потреба у створенні мобільних систем, здатних оперативно функціонувати. Відсутність таких інноваційних рішень підкреслює потенціал для майбутніх наукових досліджень у цьому напрямі.

Ключові слова: судновий дизельний двигун, параметрична діагностика, моніторинг робочого процесу, верхня мертва точка, індикаторна потужність, системи діагностики реального часу, портативні пристрої.

OVERVIEW OF MODERN TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF MARINE DIESEL ENGINE PERFORMANCE DIAGNOSTIC SYSTEMS

V.I. Zalozh

PhD, associated prof. of the Department "Engineering Sciences"
Danube Institute of National University "Odessa Maritime Academy", Izmail, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-5213-6896

Summary

Introduction. This paper explores the contemporary challenges and advancements in the performance diagnostic systems based on working process parameters of marine diesel internal combustion engines. Amid increasing demands for efficiency, reliability, and safety in maritime diesel engines, the necessity of implementing advanced performance diagnostic technologies, especially those functioning in real-time, is emphasized. These systems enable the rapid identification of operational parameter changes in diesel engines, allowing operators to quickly detect and address potential malfunctions. **The aim** of this study is to examine the existing performance diagnostic systems based on working process parameters for marine diesel internal combustion engines, to analyze their advancements and limitations, and to identify key directions for their improvement. Indeed, diagnosing and refining the working process characteristics of an engine represents a strategy to enhance the efficiency of diesel engines, laying the groundwork for the equipment's reliability and longevity. Through the analysis of indicator diagrams of gas pressure in the working cylinders, optimal operating load modes and engine diagnostics are determined. This approach provides a precise evaluation of the working process parameters and the identification of any anomalies that could lead to malfunctions. **As a result**, it contributes to improved fuel efficiency, reduced emissions harmful to the environment, and prolonged service life of marine engines. The article reviews both historical and contemporary performance diagnostic systems, presenting various approaches to the parametric diagnostics and optimization of diesel engines' working processes. Owing to the high accuracy and timeliness of the data obtained, real-time systems ensure effective monitoring and management of the engine's condition during operation. The paper also examines and contrasts some stationary performance diagnostic systems which, despite their effectiveness, exhibit certain limitations. **In conclusion**, despite the prevalent use of stationary real-time performance monitoring systems, there exists an urgent need for the development of mobile systems capable of operating efficiently and swiftly. The absence of such innovative solutions highlights the potential for future scientific research in this area.

Key words: marine diesel, parametric diagnostics, monitoring working process, top dead center, indicated power, real-time performance diagnostic systems, portable devices.

Вступ. Сучасна морська індустрія стоїть перед постійними викликами, пов'язаними з підвищенням ефективності, надійності та безпеки суднових дизельних двигунів. В умовах стрімкого технологічного розвитку стає обов'язковим впровадження новітніх засобів моніторингу, аналізу та діагностики дизельних двигунів за параметрами робочого процесу для забезпечення найвищого рівня функціональності та попередження можливих неполадок. Підвищення ефективності контролю технічного стану суднових дизелів є ключовим завданням у сфері їхньої експлуатації.

Ефективний моніторинг робочого процесу виступає основою для забезпечення надійності та довговічності обладнання. Вибір оптимального навантажувального режиму експлуатації та діагностика двигуна за параметрами робочого процесу здійснюються на основі аналізу індикаторних діаграм тиску газів у робочих циліндрах. Це дозволяє точно визначити параметри робочого процесу та виявити будь-які аномалії, що можуть призвести до неполадок. Одним із ключових етапів діагностики робочого процесу є розрахунок індикаторної потужності, яка визначає навантажувальний режим та служить основою для оцінки енергоефективності [1]. Цей розрахунок також ґрунтується на аналізі індикаторних діаграм, що дозволяє здійснювати точні виміри та контрольовану оцінку роботи дизельного двигуна в реальному часі. Такий підхід сприяє оптимізації робочого процесу, зменшенню ризиків поломок та підвищенню загальної продуктивності морського транспорту. Завдяки ефективному управлінню технічним станом суднових дизелів досягається баланс між ефективністю та надійністю їхньої експлуатації.

Актуальність. Розвиток систем діагностики суднових дизелів за параметрами робочого процесу тісно пов'язаний із загальними тенденціями у галузі Інтернету речей (*IoT*) та великих даних (*Big Data*). Використання сучасних датчиків, мікропроцесорів та алгоритмів обробки даних дозволяє отримувати величезні обсяги інформації про роботу двигуна в реальному часі та здійснювати її глибокий аналіз. Це сприяє підвищенню ефективності використання палива, зниженню шкідливих викидів у навколишнє середовище та продовженню терміну служби суднових двигунів.

Мета досліджень – огляд наявних систем діагностики суднових дизелів за параметрами робочого процесу, включаючи аналіз їх переваг та недоліків, а також визначення основних напрямів удосконалення в цій галузі.

Результати досліджень. Одна з перших, широко поширених в 1990-х рр. на флоті систем діагностики морських дизелів, а наразі вже історична – це *NK-5* і подальші *NK-100*, *NK-200* норвезької фірми *Autronica A/S*. Сучасні європейські системи – це *CMT Premet® X*, *IMES EPM-XP^{plus-vibro}*, *DEPAS D4.0H*, *Leutert DPI 50*, *MAN B&W PMI*, *Kistler (CLCC, Offline)*, *Maridis MarPrime Ultra*, *Lemag ECI*.

А також існує багато інших систем, розроблених ще до початку 2000-х років, а саме: *Premet XL*, *Dimar-Tec PTE*, *ABB Cyldet*, *Кума KDA*, *Drew Marine*, *Tx Marine*, *Digitec Diesel Tune III*, *Depas 2.0*, *Malin*, *Unitest 205* (див. табл. 1) [2–14; 19].

На сучасному етапі розвитку морського транспорту з'являється все більше систем діагностики робочого процесу суднових дизелів, які можна класифікувати на стаціонарні та портативні (переносні) системи. Стаціонарні системи діагностики становлять єдиний програмно-апаратний комплекс. Вони працюють у режимі

реального часу, забезпечуючи запис параметрів роботи двигунів та їх аналіз. Така швидка реакція на зміни дозволяє операторам негайно виявляти потенційні несправності та вживати відповідних заходів, знижуючи ризик виникнення аварійних ситуацій.

Стационарні системи діагностики робочого процесу є ефективними але вони мають низку обмежень. Вони потребують встановлення довгих кабельних ліній, що може знижувати загальну надійність системи через потенційні поломки додаткового обладнання. Крім того, висока вартість цих систем зумовлена необхідністю використання не тільки датчиків і первинних перетворювачів, але й усього проміжного обладнання. Важливим аспектом у розвитку стаціонарних систем діагностики робочого процесу є їх спеціалізація на конкретних марках дизельних двигунів. Більшість виробників дизельних двигунів фокусується на діагностиці параметрів робочого процесу лише власних моделей, тому універсальні системи, які б підходили для двигунів різних виробників, наразі перебувають на стадії розвитку.

З іншого боку, портативні системи діагностики робочого процесу, що характеризуються своєю мобільністю, пропонують більш гнучкі можливості для збору та аналізу даних. Вони використовуються для відкладеної діагностики робочого процесу, коли дані збираються в реальному часі, а аналіз проводиться пізніше. Це дозволяє проводити більш глибокий аналіз та робити виведення зі збірки даних, зібраної протягом певного періоду.

Таблиця 1

Класифікація наявних систем діагностики робочого процесу суднових дизельних двигунів

Системи діагностики робочого процесу суднових дизельних двигунів					
Стационарні		Портативні			
Реального часу (онлайн)	Відкладеної діагностики (офлайн)	Реального часу (онлайн)	Відкладеної діагностики (офлайн)		
MAN B&W PMI (Autotuning, Adaptive Cylinder Control)	MAN B&W PMI Offline	CMT Premet® X	IMES EPM-XP ^{plus-vibro}		
			CMT Premet® M		
			DEPAS D4.0H		
Icon Research DK-200 (Doctor Analysis)	Autronica A/S NK-5, NK-100, NK-200			Icon Research DK-20	
			MAN PMI VIT		
Kistler CLCC (Closed-Loop Combustion Control)				Maridis MarPrime Ultra	
PREMET Online				Lemag ECI, Premet XL, C	
ABB Cylmate					Kistler Offline Type 2516B12
					Leutert DPI 50
					DocPad 1/2 e-600 e-line
					Кума KDA
					ABB Cyldet
				Digitec Diesel Tune III	
				Dimar-Tec PTE	
				Tx Marine PMI mkII	
		Unitest 205			
			Drew marine DPA-EZ		

Нині портативних систем, які б працювали в режимі реального часу та надавали б негайні рекомендації під час індиціювання, не так багато. Проте цей напрям вважається дуже перспективним, особливо з урахуванням швидкого розвитку технологій штучного інтелекту, цифрових двійників та потужних методів математичного моделювання [15].

Про перші спроби в цьому напрямі заявляє компанія CMT у своїй портативній онлайн-системі *Premet® X* типу *DPA-CT-12020* (див. рис. 1) [19].



Рис. 1. Портативні системи діагностики робочого процесу компанії CM Technologies GmbH: а) реального часу; б) відкладеної діагностики; в) опціональний вібродатчик [19]

Система, виготовлена у Німеччині, використовує найновіший датчик тиску *Piezosmart* від *Kistler* у базовій версії та опціонально вібродатчик. Вібродатчик являє собою п'єзоелектричний пристрій, оснащений інтегрованим підсилювачем та блоком формування сигналу. Він виявляє акустичні хвилі у діапазоні від 300 до 700 кГц, що генеруються такими процесами, як впорскування палива через форсунку, закриття вихлопного клапану, удар голки форсунки, а також процеси відсічки у паливному насосі.

Система адаптована до роботи з двигунами різної потужності – від низькообертових до високообертових, сприяючи оптимізації впорскування палива для зниження паливної витрати та мінімізації ризиків пошкоджень і ремонтних робіт.

Портативний елемент системи являє собою високопродуктивний сенсорний комп'ютер, який у комплекті з програмним забезпеченням *Premet® Viewer* забезпечує ефективну діагностику робочого процесу та високу точність вимірювань під час роботи в різноманітних умовах експлуатації.

Портативні (переносні) системи діагностики робочого процесу представляють собою компактні та легкі пристрої, спроектовані для вимірювання, збору даних і контролю параметрів у режимі відкладеної діагностики. Відкладена діагностика робочого процесу означає систему збору та аналізу даних, що здійснюється з затримкою в часі. Тобто інформація збирається в реальному часі, але аналіз та висновки можуть бути проведені пізніше.

Системи діагностики реального часу надають негайну реакцію на будь-які зміни в параметрах роботи суднового дизельного двигуна, дозволяючи механікам швидко виявляти можливі проблеми. Дані, отримані у реальному часі, відзначаються високою точністю і актуальністю, що сприяє ефективному контролю та управлінню станом двигуна в реальних умовах експлуатації. Оператори можуть миттєво взаємодіяти з системами діагностики робочого процесу, вносячи корективи у роботу двигуна чи вживаючи невідкладних заходів у разі виявлення проблем.

Індикаторні діаграми записуються на працюючому під навантаженням двигуні за допомогою спеціальних датчиків тиску. Ці датчики мають забезпечувати стабільність характеристик навіть за високої температури вимірюваного середовища, що критично важливо для точності вимірювань. Наприклад, датчики *IMES*, *Kistler*, *ABB* широко використовуються в цій галузі завдяки їх високій точності та надійності у вимірюваннях за високих температур [2; 11].

У стаціонарних системах діагностики робочого процесу, які є невід'ємною частиною сучасних суднових дизельних двигунів, датчики тиску газів встановлюються на всіх циліндрах. Це забезпечує повноцінний і неперервний контроль за станом кожного циліндра двигуна. Завод-виробник за замовчуванням інтегрує ці датчики в двигуни, що гарантує високу точність вимірювань та оптимізацію роботи системи. Стаціонарні системи діагностики робочого процесу забезпечують постійний збір даних, що є ключовим для точного моніторингу та аналізу робочих характеристик двигуна. Застосування таких датчиків дозволяє отримувати детальну інформацію про внутрішні процеси в двигуні, включаючи робочі параметри та положення поршня. Ця інформація є невід'ємною частиною для здійснення точної діагностики стану двигуна, а також для планування профілактичного обслуговування та ремонту.

У контрасті зі стаціонарними системами портативні системи діагностики робочого процесу зазвичай комплектуються одним датчиком тиску, який може бути почергово встановлений на індикаторний кран відповідного циліндра за допомогою *Thomson adapter*. Залежно від типу система додатково може бути обладнана магнітним вібродатчиком (система *IMES EPM-XP plus-vibro*, *DEPAS D4.0H*, *CMT Premet® X*) для контролю роботи паливної апаратури високого тиску, впускних/випускних клапанів та давати цінну інформацію про технічний стан основних вузлів, таймінг паливоподачі та таймінг газорозподілу двигунів [2; 3].

Такий підхід дозволяє здійснювати гнучкі вимірювання тиску в різних циліндрах без потреби в постійній інтеграції датчиків у двигун. Це особливо важливо для діагностики робочого процесу та обслуговування двигунів, які не оснащені стаціонарними системами. Портативні системи надають операторам можливість проводити точні та цілеспрямовані перевірки стану двигуна в будь-який час та в будь-якому місці. Крім того, вбудовані в стаціонарних системах датчики тиску необхідно періодично калібрувати портативною системою.

У сучасних системах діагностики робочого процесу суднових дизелів значення тиску фіксуються у вигляді часових рядів $P(t)$, де дані записуються з постійними проміжками часу. Зазвичай крок дискретизації обирається так, щоб за один градус повороту колінчастого валу можна було отримати принаймні дві точки вимірювань. Це забезпечує достатню точність для аналізу робочого циклу двигуна.

Перетворення часових рядів $P(t)$ на індикаторні діаграми полягає у перекладі даних із функцій часу до функцій кута повороту колінчастого валу. Тут особливо увагу приділяють точності визначення верхньої мертвої точки (далі – ВМТ) поршня,

оскільки вона має ключове значення для аналізу робочих характеристик двигуна [16]. Існує два основних рішення – апаратне та аналітичне. Апаратний метод включає використання датчиків, розміщених на маховику двигуна, які дозволяють точно визначити положення колінчастого валу. Аналітичний метод передбачає аналіз діаграми тиску газів у циліндрі та її похідних, що дозволяє визначити ВМТ з високою точністю, навіть без безпосереднього використання додаткових датчиків.

Розглянемо декілька прикладів систем діагностики робочого процесу суднових дизельних двигунів.

Серед різних аналітичних методів на особливу увагу заслуговує система моніторингу робочого процесу *The Electronic Indicator Lemag "Premet XL, C"* [17], яка була однією з перших у використанні аналітичних методів для корекції ВМТ на практиці. Ця система використовує комплексний підхід до аналізу робочих характеристик двигуна, забезпечуючи високу точність та надійність діагностики.

У системі передбачено напівавтоматичну (за участю оператора) побудову дотичної до кривої швидкості зміни тиску в циліндрі на ділянці до ВМТ. Координата перетину цієї дотичної нуля (за шкалою $dp/d\phi$) припускається уточненим значенням ВМТ. Пропонується змістити всю індикаторну діаграму (скорегувати положення ВМТ) так, щоб ця дотична перетнула «0» в позиції ВМТ. Мається на увазі той факт, що за відсутності подачі палива (процес стиснення-розширення в циліндрі без згоряння) швидкість зміни тиску в ВМТ повинна дорівнювати нулю. Цей вираз не зовсім коректний, тому що існує термодинамічний зсув діаграми тиску за рахунок передачі теплоти в стінки циліндра. За рахунок термодинамічного зсуву вся діаграма тиску трохи зміщується вліво, максимум стиснення знаходиться до ВМТ і, відповідно, крива $dp/d\phi$ теж перетинає «0» трохи лівіше реального значення ВМТ. Цей факт можна врахувати за рахунок постійної корекції ВМТ, тому що термодинамічний зсув є вельми малим і для більшості морських двигунів його величина не перевищує 1 ПКВ [18].

Неврахування термодинамічного зсуву реальних індикаторних діаграм тиску в робочому циліндрі більшістю сучасних систем моніторингу робочого процесу суднових дизелів можна пояснити такими суб'єктивними причинами:

- термодинамічний зсув малий (менше 1° ПКВ), його розрахунок може бути проведений тільки при емпіричному завданні коефіцієнтів теплообміну. Розрахунок цих коефіцієнтів за різними методиками дає результати, що відрізняються майже на 100% [15; 16];

- неврахування термодинамічного зсуву діаграми вліво до ВМТ дає ефект штучного збільшення середнього індикаторного тиску й індикаторної потужності, що, безумовно, подобається механікам, які експлуатують двигун, які розраховують питомі показники двигунів для регулярних звітів.

Проте майже всі сучасні системи діагностики робочого процесу суднових дизелів мають можливість вводити постійні коефіцієнти для корекції ВМТ, що дає можливість враховувати як термодинамічний зсув, так і систематичні похибки розрахунку.

Компанія *Icon Research* представляє одразу два варіанти – стаціонарну систему реального часу *DK-200* і портативну *DK-20* [13]. Для обох систем застосовується програмне забезпечення *Doctor Analysis* версії 6.4. Необхідно виділити інтерфейс програми, який вирізняється яскравим, інтуїтивно зрозумілим дизайном з легкою навігацією та динамічною візуалізацією, високою роздільною здатністю 0,1° ПКВ, що дозволяє користувачам легко аналізувати складні набори даних. Окрему вагу

слід приділити функціоналу програмного забезпечення, який може автоматично встановити попередній діагноз, порівняти основні параметри роботи двигуна з результатами, отриманими під час заводських або морських випробувань. Додатково програма надає гвинтову характеристику, на якій представлено відсоток максимальної експлуатаційної потужності (MCR) у відношенні до обертів, і відображає робочий режим двигуна.



а) DK-200

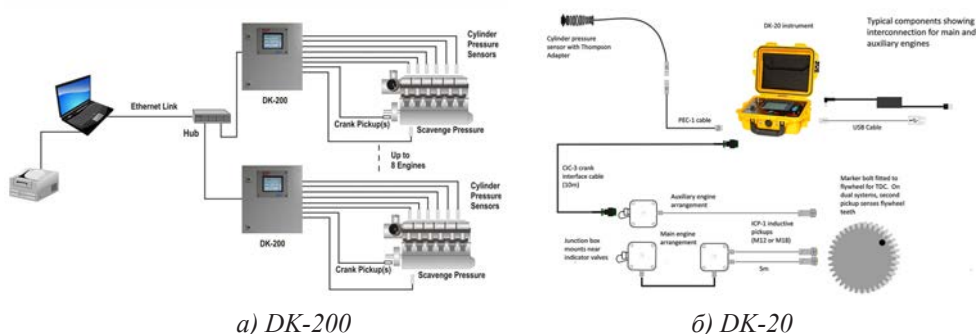
б) DK-20

в) Doctor Analysis

Рис. 2. Зовнішній вигляд стаціонарної (а), портативної (б) системи моніторингу робочого процесу від Icon Research та інтерфейсу програми Doctor Analysis (в)

Визначення положення верхньої мертвої точки здійснюється за допомогою спеціалізованих датчиків, розташованих на маховику, і в подальшому корегується за необхідності в програмному забезпеченні.

З практичної точки зору зупинка постійно працюючих суднових двигунів для монтажу датчиків, включаючи індуктивні сенсори на маховику та тиск палива, є складним завданням. Зміна режиму роботи двигуна також становить труднощі через вимоги безпеки мореплавства. Крім того, морські умови, що непередбачувано змінюються, та постійна зміна навантаження, частоти обертання двигунів вимагають застосування квазістаціонарного режиму для точної діагностики робочого процесу та визначення потужності, що ускладнено змінними хвильовими та вітровими умовами. Отже, вимірювання на двигунах мають бути виконані максимально швидко й оперативно.



а) DK-200

б) DK-20

Рис. 3. Схема зовнішніх з'єднань стаціонарної (а) та портативної (б) системи діагностики робочого процесу від Icon Research [13]

Технічні специфікації системи підкреслюють, що точне налаштування ВМТ

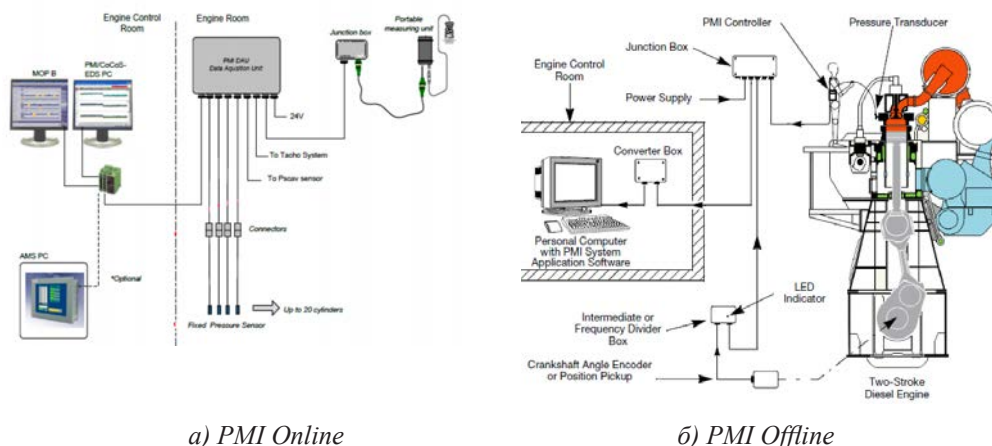
має вирішальне значення. Неправильне визначення ВМТ може спричинити помилки у вимірюванні потужності. Варто звернути увагу на те, що *Icon Research* пропонує налаштування ВМТ. Для отримання цієї послуги необхідно надіслати лог-файли моніторингових тестів на електронну пошту компанії.

Всесвітньо відома компанія *MAN B&W* надає готові рішення для своїх двигунів серії ME з електронним управлінням у вигляді стаціонарних систем діагностики робочого процесу *PMI (VIT, Autotuning, Adaptive Cylinder Control, Offline)* [5]. Системи функціонують за єдиним принципом: модуль діагностики через сенсор, встановлений на кожному циліндрі, вимірює тиск у циліндрах, а зібрана інформація про тиск використовується для автоматизованого балансування та регулювання роботи двигуна. Існує дві версії систем – офлайн і онлайн.



Рис. 4. Портативні пристрої *PMI Controller*

Онлайн-версія системи (рис. 5 а), використовує набір датчиків тиску, які стаціонарно вмонтовані на кожному циліндрі двигуна. Усі виміри відображаються в реальному часі на ПК в приміщенні ЦПУ. Цей комп'ютер називається *PMI PC*.



а) *PMI Online*

б) *PMI Offline*

Рис. 5. Структура онлайн- (а) та офлайн- (б) версій систем діагностики *PMI* від *MAN B&W* [5]

У офлайн-версії (рис. 5 б) використовується п'єзоелектричний перетворювач, який приєднується до портативного пристрою під назвою *PMI Controller* (див. рис. 4). Цей пристрій підключається до розподільної коробки біля двигуна.

Центральний елемент системи діагностики двигуна (*EMS MOP*) представлений головною операційною панеллю, яка оснащена програмами *PMI* та *CoCoS-EDS*. Ці програмні рішення розроблені для деталізованого реєстрування, відстеження та аналітичного оцінювання процесів згоряння. Використання даного інтерфейсу дозволяє операторам не лише спостерігати за актуальним станом роботи двигуна, а й проводити глибокий аналіз робочих циклів згоряння та змін основних параметрів робочого процесу двигуна. Такий підхід сприяє точній діагностиці робочого процесу та ідентифікації потенційних проблем. Система *PMI* показує автоматичний розрахунок ефективної потужності, середнього індикаторного тиску P_p , тиску стиснення P_{comp} , максимального тиску згоряння P_{max} та відношення тиску стиснення до тиску наддуву P_{comp}/P_{scav} . Також надається графічне представлення діаграм *PT*, *PV* та балансування, розраховуються пропозиції щодо коригування індексу паливного насоса (див. рис. 6).

Датчики тиску передають дані до системи *PMI*, далі до *CoCoS-EDS*, що дозволяє екіпажу проаналізувати отримані дані та визначити, чи потрібні корекції для покращення робочих параметрів двигуна на інтерфейсі *MOP*.

Визначення положення колінчастого валу та ВМТ здійснюється за допомогою спеціалізованих кутових датчиків – енкодерів. Фізично вони являють собою герметизований блок, який встановлено до вільного кінця колінчастого валу за допомогою спеціальної гнучкої муфти.

Цей блок містить диск з оптичним кодуванням, який приводиться в дію ззовні, встановлений між внутрішнім джерелом світла та детектором. Він виробляє послідовність електричних імпульсів за оберт, які використовуються для виявлення абсолютного положення колінчастого валу.



Рис. 6. Інтерфейси програми системи діагностики робочого процесу *PMI*

Використання стаціонарних та портативних типів систем відображає гнучкість сучасних методів діагностики робочого процесу суднових дизелів. Стаціонарні системи забезпечують неперервну діагностику робочого процесу, тоді як портативні системи пропонують переваги мобільності та зручності для точкових перевірок. Обидва підходи мають свої переваги та недоліки, але разом вони забезпечують комплексне рішення для ефективної діагностики робочого процесу суднових дизелів, збільшуючи ефективність їх роботи та надійність.

Висновки. Таким чином, існує потреба у створенні портативних систем діагностики суднових дизелів за параметрами робочого процесу нового покоління. Ці системи мають забезпечити низку переваг порівняно з наявними системами, серед яких слід виділити можливість роботи в режимі реального

часу, тобто змогу отримувати інформацію щодо протікання робочого процесу у циліндрах двигуна й оцінювати параметри цих процесів безпосередньо під час роботи двигуна. Такий підхід дозволяє як здійснювати регулювання двигуна під час його роботи, так і визначати специфічні несправності, пов'язані з нерівномірністю робочих циклів двигуна. Для створення таких систем необхідно вирішити важливі наукові та практичні проблеми та задачі, серед яких основними є такі:

- розробити специфічні методи діагностування двигуна за параметрами робочого процесу в режимі реального часу, які дозволять отримати додаткову важливу інформацію порівняно з наявними системами;
- визначити способи оцінки циклової нерівномірності при роботі двигуна та виявити діагностичні ознаки несправностей, які її спричиняють;
- розробити концепцію системи діагностування з застосуванням сучасних та перспективних технологій, притаманних індустрії 4.0;
- розробити ефективні алгоритми для обробки, фільтрації та синхронізації даних, зокрема вдосконалити метод визначення положення верхньої мертвої точки без застосування апаратних датчиків;
- розробити відповідне програмне забезпечення, реалізоване у вигляді кінцевого програмного продукту;
- провести випробування для перевірки надійності та ефективності системи.

Створення таких систем, які мають потенціал інтеграції з сучасними інформаційними системами, є важливим напрямом удосконалення ефективності експлуатації суднових енергетичних установок.

ЛІТЕРАТУРА

1. Суворов П.С., Тарасенко Т.В., Залож В.І. Деякі питання оцінки енергоефективності суден в умовах енергетичного переходу у внутрішньому судноплавстві. *Двигуни внутрішнього згорання*. 2023. Вип. № 2 (2023). С. 37–45. DOI: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2023.2.05>.
2. IMES cylinder pressure sensors : вебсайт. URL: <https://www.imes.de> (дата звернення: 16.01.2024).
3. DEPAS Laboratory : вебсайт. URL: <http://depas.od.ua/> (дата звернення: 11.01.2024).
4. Digital Pressure Indicator DPI Leutert DPI-Type 50 : вебсайт. URL: <https://www.leutert.com/> (дата звернення: 09.01.2024).
5. MAN Energy Solutions PMI : вебсайт. URL: https://www.man-es.com/docs/default-source/document-sync-archive/performance-measurement-indicator-eng.pdf?sfvrsn=8ce6c8eb_4 (дата звернення: 20.01.2024).
6. Pressure and TDC sensors from Kistler : вебсайт. URL: <https://www.kistler.com> (дата звернення: 04.11.2023).
7. MARIDIS Maritime Diagnosis & Service : вебсайт. URL: <https://www.maridis.de/en/contact-us.html> (дата звернення: 24.01.2024).
8. Lemag ECI Electronic Cylinder Pressure Indicator : вебсайт. URL: <https://chris-marine.com/products/monitoring-of-diesel-and-gas-engines/electronic-cylinder-pressure-indicator-eci/> (дата звернення: 24.01.2024).

9. Dimar-Тес PTE Electronic Cylinder Pressure Indicator : вебсайт. URL: <http://dimar-tec.com/product.php?pid=CBM&pcode=CBM003> (дата звернення: 20.01.2024).
10. Кума Diesel Analyzer : вебсайт. URL: www.kuma.no (дата звернення: 10.01.2024).
11. ABB Cylmate : вебсайт. URL: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3BSE035687R0101&LanguageCode=en&DocumentPartId=001&Action=Launch> (дата звернення: 15.01.2024).
12. DocGate 732 e-line : вебсайт. URL: <https://vicusdt.com/en/propulsion-equipment/engine-performance/> (дата звернення: 16.01.2024).
13. Diesel Engine Analysis, Doctor Analysis : вебсайт. URL: <https://iconresearch.co.uk/diesel-engine-analysis/> (дата звернення: 17.01.2024).
14. Tx Marine Messsysteme GmbH PMImk2 : вебсайт. URL: <https://txmarine.com/en/products/cylinderpressure/#toggle-id-1> (дата звернення: 18.01.2024).
15. Digital twin test-bench performance for marine diesel engine applications / D. Minchev, R. Varbanets, O. Shumylo, V. Zalozh, N. Aleksandrovska, P. Bratchenko, Thanh Hai Truong. *Polish Maritime Research*. 2023. Vol. 30. № 4 (120). P. 81–91. DOI: <https://www.doi.org/10.2478/pomr-2023-0061>.
16. Varbanets R. Determination of top dead centre location based on the marine diesel engine indicator diagram analysis. *Diagnostyka*. 2020. № 21 (1). P. 51–60. DOI: <https://doi.org/10.29354/diag/116585>.
17. Lemag PreMet XL, C Cylinder Pressure Indicator : вебсайт. URL: <http://www.lemag.de/> (дата звернення: 17.01.2024).
18. Особливості аналітичної синхронізації даних моніторингу робочого процесу транспортних дизелів в умовах експлуатації / Р.А. Варбанець, В.І. Залож, Т.В. Тарасенко, Ю.М. Кучеренко, В.Г. Клименко. *Двигуни внутрішнього згоряння*. 2020. Вип. № 1 (2020). С. 14–21. DOI: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2020.1.02>.
19. CM Technologies Monitoring Innovations : вебсайт. URL: <https://www.cmtechnologies.de/en/products-en/performance-and-efficiency-monitoring/premet-x-en.html> (дата звернення: 20.01.2024).

REFERENCES

1. Suvorov, P. & Tarasenko, Tetyana & Zalozh, Vitalii. (2023). Some issues of vessels energy efficiency assessment in the inland shipping energy transition conditions. *Internal Combustion Engines*, №2 (2023), 37-45. DOI: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2023.2.05>
2. IMES cylinder pressure sensors: web site. URL: <https://www.imes.de> (Retrieved: 16.01.2024).
3. DEPAS Laboratory: web site. URL: <http://depas.od.ua/> (Retrieved: 11.01.2024).
4. Digital Pressure Indicator DPI Leutert DPI-Type 50: web site. URL: <https://www.leutert.com/> (Retrieved: 09.01.2024).

5. MAN Energy Solutions PMI: web site. URL: https://www.man-es.com/docs/default-source/document-sync-archive/performance-measurement-indicator-eng.pdf?sfvrsn=8ce6c8eb_4 (Retrieved: 20.01.2024).
6. Pressure and TDC sensors from Kistler: web site. URL: <https://www.kistler.com> (Retrieved: 04.11.2023).
7. MARIDIS Maritime Diagnosis & Service: web site. URL: <https://www.maridis.de/en/contact-us.html> (Retrieved: 24.01.2024).
8. Lemag ECI Electronic Cylinder Pressure Indicator: web site. URL: <https://chris-marine.com/products/monitoring-of-diesel-and-gas-engines/electronic-cylinder-pressure-indicator-eci/> (Retrieved: 24.01.2024).
9. Dimar-Tec PTE Electronic Cylinder Pressure Indicator: web site. URL: <http://dimar-tec.com/product.php?pid=CBM&pcode=CBM003> (Retrieved: 20.01.2024).
10. Kyma Diesel Analyzer: web site. URL: www.kyma.no (Retrieved: 10.01.2024).
11. ABB Cylmate: web site. URL: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3BSE035687R0101&LanguageCode=en&DocumentPartId=001&Action=Launch> (Retrieved: 15.01.2024).
12. DocGate 732 e-line: web site. URL: <https://vicusdt.com/en/propulsion-equipment/engine-performance/> (Retrieved: 16.01.2024).
13. Diesel Engine Analysis, Doctor Analysis: web site. URL: <https://iconresearch.co.uk/diesel-engine-analysis/> (Retrieved: 17.01.2024).
14. Tx Marine Messsysteme GmbH PMImk2: web site. URL: <https://txmarine.com/en/products/cylinderpressure/#toggle-id-1> (Retrieved: 18.01.2024).
15. Minchev, D., Varbanets, R., Shumylo, O., Zalozh, V., Aleksandrovska, N., Bratchenko, P. & Truong, T. (2023). Digital Twin Test-Bench Performance for Marine Diesel Engine Applications. *Polish Maritime Research*, 30(4) 81–91. DOI: <https://doi.org/10.2478/pomr-2023-0061>.
16. Varbanets, R. A., Zalozh, V. I., Shakhov, A. V., Savelieva, I. V., Piterska, V. M. (2020). Determination of top dead centre location based on the marine diesel engine indicator diagram analysis. *Diagnostyka*, 21(1), 51-60. DOI: <https://doi.org/10.29354/diag/116585>.
17. Lemag PreMet XL, C Cylinder Pressure Indicator: web site. URL: <http://www.lemag.de/> (Retrieved: 17.01.2024).
18. Varbanets, R.A., Zalozh, V.I., Tarasenko, T.V., Kucherenko, Yu.M., Klimenko, V.G. (2020). Features of analytical synchronization of data of working process monitoring in transport diesel engines under operation. *Internal Combustion Engines*, №1, 14–21. DOI: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2020.1.02>.
19. CM Technologies Monitoring Innovations: web site. URL: <https://www.cmtechnologies.de/en/products-en/performance-and-efficiency-monitoring/premet-x-en.html> (Retrieved: 20.01.2024).

THE IMPACT OF HEAT-EXCHANGERS SURFACE FOULING AND THE POSSIBILITIES OF THEIR CLEANING

V.I. Kholdenko

Senior Lecturer,

Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine,

ORCID ID: 0000-0003-0071-7055

Summary

Introduction: This study investigates the real-world effects of pollutants on ship heat exchangers in the marine sector, focusing on the complex issues influencing maintenance expenses, environmental sustainability, and operational effectiveness. The core of the issue is figuring out a long-term, practical way to lessen the damage that heat-exchangers surface heat-exchangers surface fouling causes to ship heat exchangers. **Purpose.** The article aims to investigate and evaluate how pollutants affect ship heat exchangers in the marine sector from a practical standpoint. It seeks to shed light on how pollutants, such as chemicals, debris, and oil residues, impact a vessel's environmental sustainability, maintenance costs, and operational effectiveness. The essay analyzes the complex issues caused by surface fouling-induced damage, highlighting the dangers of decreased thermal conductivity, greater overheating, higher maintenance costs, longer downtime, and possible environmental effects. **Result.** One practical consequence of pollutant-induced damage is that it calls for substantial and frequent cleaning, repairs, and maybe replacements of the heat exchanger components, which raises maintenance costs. Traditional cleaning procedures involve prolonged downtime for manual intervention, which worsens the economic effects on shipping businesses and trade routes. Furthermore, the study highlights the negative effects uncontrolled pollutants have on the environment, highlighting how crucial regulatory compliance is to avoiding legal ramifications and preserving the good name of the sector. **Conclusion.** In conclusion, preserving marine operational effectiveness and environmental sustainability requires reducing the impact of pollutants on ship heat exchangers. The selection of particular heat exchanger types requires customized cleaning techniques. Advanced solutions are provided by ecologically safe chemical agents, high-pressure water jets, and automated robotic systems. To avoid losing efficiency, regular cleaning must be done under the direction of real-time monitoring. Maintaining heat exchanger performance and guaranteeing the lifespan of ship power plants in the face of changing surface fouling concerns requires striking a compromise between operational needs, environmental responsibility, and proactive maintenance.

Key words: Ship Heat Exchangers, Heat-exchangers surface heat-exchangers surface fouling Impact, Operational Efficiency, Maintenance Costs, Environmental Sustainability.

ВПЛИВ ЗАБРУДНЕННЯ НА РОБОТУ СУДНОВИХ ТЕПЛОБМІННИКІВ І МОЖЛИВОСТІ ЇХ ОЧИЩЕННЯ

В.І. Холденко

доцент,

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0003-0071-7055

Анотація

Вступ. Це дослідження присвячене вивченню реального впливу забруднюючих речовин на суднові теплообмінники в морському секторі. Автор зосереджується на складних питаннях, що впливають на витрати на технічне обслуговування, екологічну стійкість і експлуатаційну ефективність. Суть проблеми полягає в тому, щоб знайти довгостроковий і практичний спосіб зменшити шкоду, яку забруднення завдає судновим теплообмінникам. **Мета.** Забруднюючі речовини знижують теплопровідність і експлуатаційну ефективність шляхом утворення ізоляційних шарів на поверхнях теплообмінників з бруду, хімікатів і залишків нафти. Отже, існує пряма загроза надійності судна через підвищену ймовірність перегріву двигуна, що підкреслює критичну необхідність застосування методів зменшення забруднення. **Результат.** Одним з практичних наслідків пошкоджень, спричинених забруднюючими речовинами, є необхідність значного і частого очищення, ремонту і, можливо, заміни компонентів теплообмінника, що підвищує витрати на технічне обслуговування. Традиційні процедури очищення передбачають тривалі прості для ручного втручання, що погіршує економічні наслідки для судноплавних компаній і торговельних шляхів. Крім того, у дослідженні підкреслюється негативний вплив неконтрольованих забруднювачів на навколишнє середовище, тому важливим є дотримання нормативних вимог для уникнення юридичних наслідків і збереження доброго імені галузі. **Висновок.** Для подолання цих реальних наслідків необхідна комплексна стратегія, що включає передові технології очищення, проактивні процедури технічного обслуговування та дотримання екологічного законодавства. Таким чином, морський сектор може зменшити небезпеку для економіки, безпеки та довкілля, пов'язану з впливом забруднюючих речовин на суднові теплообмінники, зберігаючи при цьому надійність і ефективність експлуатації суден навіть перед обличчям мінливих загроз.

Ключові слова: суднові теплообмінники, вплив забруднення, експлуатаційна ефективність, витрати на технічне обслуговування, екологічна стійкість.

Introduction. The maritime sector is essential to international trade because it makes it easier to move products across large oceans. The heat-exchangers surface fouling as well as its far-reaching effects provide a serious issue for this vital industry. Heat-exchangers surface fouling's impact on ship heat exchange systems has become one of the most important environmental challenges impacting marine operations. For maritime operations, the surface fouling of ship heat exchanger surfaces presents an important threat to the environment. In addition to reducing internal power plant efficiency, it raises fuel consumption and emissions, which degrades the quality of the air and water. If pollutants and debris are spilled during cleaning, marine ecosystems may

suffer. Financial penalties for breaking environmental standards highlight the industry's accountability. Reducing heat exchanger surface fouling is in line with more general environmental sustainability objectives, which acknowledge the marine industry's contribution to reducing its ecological impact worldwide. Ship heat exchangers are crucial parts of a vessel's cooling and propulsion systems, and the entire performance of marine engines depends on their operating efficiency [7].

The persistent growth in maritime heat-exchangers surface fouling, resulting from diverse human activities, has presented a range of difficulties for ship operators. Reasons for Growth: (1) **Human Activities:** Higher surface fouling discharges are a result of increased shipping, industrial activity, and maritime traffic. Inadequate Waste Management: Surface fouling builds up as a result of improper disposal techniques and insufficient waste treatment. (2) **Inadequate Cleaning Procedures:** Over time, contaminants can build up in heat exchangers due to infrequent or ineffective cleaning. The effective working of heat exchangers can be jeopardized by pollutants including oil, debris, and chemicals, which can result in decreased efficiency and higher operational expenses. The decreased efficiency of these essential components is a connection between increased operating costs and heat exchanger surface fouling.

The accumulation of pollutants on the surfaces of heat exchangers creates insulating layers that impede the movement of heat and lower cooling system performance.

Fuel consumption rises when efficiency declines because more energy is needed to produce the same amount of heat exchange. Increased fuel consumption results in higher operational costs, which affect the overall economic feasibility of ship operations. These costs include gasoline [3].

Thermal conductivity degradation is one of the main effects of pollutants on ship heat exchange systems. Pollutants reduce the efficiency of heat transmission among the fluid being used and the environment by building up a layer that serves as a thermal barrier. This reduced thermal conductivity raises the possibility of overheating and reduces heat exchange efficiency, both of which can seriously harm engine components.

The marine sector has been aggressively researching cutting-edge methods for maintaining and cleaning ship heat exchangers as a solution to these difficulties. To lessen the negative impacts of heat-exchangers surface heat-exchangers surface fouling and maintain the long-term effectiveness of heat exchange systems, efficient cleaning techniques must be developed [4].

There is now a number of cleaning methods being considered, from sophisticated chemical solutions to conventional mechanical approaches. In mechanical techniques, accumulated impurities are removed from heat exchanger surfaces using brushes, scrapers, or high-pressure water jets. These techniques can be useful, but they can also have drawbacks, such the requirement for a lot of downtime and the possibility of damaging sensitive components.

Conversely, chemical cleaning techniques use specifically designed chemicals to dissolve and extract contaminants without requiring mechanical assistance. These techniques provide a less intrusive and more effective way to maintain heat exchangers. To prevent any negative effects both the environment or any of the heat exchanger's components, nevertheless, considerable consideration must be given to the selection of the right cleaning chemicals [3].

Formulation of Problem. The smooth movement of products across seas is contingent upon the efficiency and dependability of ship power plant, which in turn affects the functioning of ship heat exchangers. The issue at stake involves the harmful effects of heat-exchangers surface heat-exchangers surface fouling on ship heat exchangers' capacity to operate at their best, which raises questions regarding the durability and sustainability of these vital components.

The main issue is that impurities build up on heat exchanger surfaces, interfering with the vital function of heat transmission. The collection of this material creates insulating layers that impede the effective transfer of heat between the surrounding environment and the working fluid. Thus, the reduced thermal conductivity directly jeopardizes the integrity of marine engines by reducing heat exchange efficiency and increasing the possibility of overheating [9].

Moreover, there are difficulties with the techniques used to maintain and clean ship heat exchangers. Even while traditional mechanical techniques are good at eliminating pollutants, they have disadvantaged such long downtime and the possibility of damaging sensitive components. Chemical cleaning techniques provide a less intrusive and more effective alternative, but their effects on the environment and material compatibility must be carefully considered [6].

The core of the issue is figuring out a long-term, practical way to lessen the damage that heat-exchangers surface heat-exchangers surface fouling causes to ship heat exchangers. Ensuring the continuous dependability and functionality of these vital components in the marine sector requires striking a balance between the requirement for effective cleaning techniques and environmental responsibility.

Analysis of recent research and publications: The numerous difficulties that the marine sector faces have been made clear by recent studies and publications on ship heat exchangers and their susceptibility to heat-exchangers surface heat-exchangers surface fouling. The impact of heat-exchangers surface heat-exchangers surface fouling on these essential components' functionality is becoming increasingly apparent as heat-exchangers surface heat-exchangers surface fouling levels rise worldwide, and researchers and professionals are working hard to find creative ways to deal with this pressing problem [7].

The kinds and sources of contaminants impacting ship heat exchangers have been the subject of several research. These consist of chemical pollutants, oil residues, and waste products from different human activities. For the purpose of creating efficient cleaning techniques suited to particular environmental circumstances and vessel operations, it is essential to comprehend the makeup and properties of these contaminants. The necessity for a thorough strategy to heat-exchangers surface heat-exchangers surface fouling control that considers the variety of pollutants encountered during marine activities is emphasized in recent publications [2; 5].

Recent studies have highlighted the link between pollutant buildup and thermal conductivity degradation in terms of the negative impacts of pollutants on heat exchanger performance. Experiments and computational models have been used to measure the effects of various pollutants' kinds and concentrations on the effectiveness of heat transfer. These evaluations contribute to the creation of focused solutions by offering insightful information about the ways by which heat-exchangers surface fouling impedes heat exchange activities [1; 5].

A prominent pattern observed in recent literature is the investigation of cutting-edge cleaning systems for ship heat exchange systems. Scholars are examining the efficacy of robotics cleaning equipment that can maneuver intricate heat exchanger arrangements to eliminate contaminants without requiring human assistance. These developments overcome some of the drawbacks of conventional mechanical approaches by reducing downtime while also improving cleaning precision and thoroughness [10]. Recent research has also focused on chemical cleaning agents, with the goal of creating solutions that are both ecologically benign and compatible with various materials. Publications stress how crucial it is to use cleaning products that reduce the environmental impact of maritime activities while simultaneously efficiently dissolving contaminants. Exploring bio-based cleaning agents along with additional environmentally friendly formulations has resulted from the search for sustainable alternatives and is in line with a growing focus on environmentally friendly procedures in the marine sector [11]. Additionally, the financial effects of pollutants on ship heat exchangers have been discussed in recent papers. Ship operators are becoming increasingly concerned about the financial impact of higher repair, maintenance, and replacement expenses as a result of damage caused by pollutants. Scholars are conducting cost-benefit analyses of various cleaning techniques, taking into account variables including fuel economy, operational downtime, and long-term maintenance needs [6].

To sum up, current studies and publications emphasize how urgent it is to address how heat-exchangers surface fouling affects ship heat exchangers. The wide range of subjects covered, from heat-exchangers surface fouling analysis to the development of cutting-edge cleaning methods, clearly demonstrates the multidisciplinary nature of this challenge. The collection of research results from these studies adds to the expanding volume of information that may guide business choices and legislative actions, eventually guiding the marine sector toward more resilient and sustainable solutions to the ever-increasing heat-exchangers surface fouling problems.

Formulation of goal of the article. This article's main objective is to present a thorough explanation of the complex impact of surface fouling on heat exchangers system. It also explores workable methods to reduce the negative impacts and maintain the long-term efficiency of ship power plant. The essay seeks to clarify the problems caused by heat-exchangers surface fouling, assess the existing level of knowledge, and provide strategic objectives for the marine sector and research community by combining insights from recent studies and publications.

The article's primary goal is to highlight the seriousness of the issue by outlining the many pollutants that have an effect on ship heat exchangers. The objective is to highlight the vital significance of recognizing the many different types of pollutants, including oil residue to chemical pollutants and debris, through an analysis of current research. The article seeks to build the groundwork for focused interventions in heat-exchangers surface fouling control by providing a comprehensive knowledge of various kinds and sources of pollutants.

The article aims to clarify the ways in which pollutants impair thermal conductivity and, in turn, the overall effectiveness of heat exchange processes by utilizing the results of recent research. This study emphasizes the need for creative and long-lasting solutions while laying the groundwork for a more in-depth investigation of cleaning techniques.

The goal's formulation includes an investigation of current developments in chemical agents and cleaning technology. In order to assess these methods' viability and efficacy in practical marine applications, the paper will look at robotic cleaning systems, sustainable formulations, and other innovative techniques. The objective also includes addressing economic factors, providing information on the financial effects of pollutants on ship heat exchange equipment and suggesting financially sensible solutions for ship operators.

Presentation of the main research material. Pollutant kinds and sources impacting ship heat exchangers vary and can have a major effect on these vital marine sector components' performance and efficiency. For the purpose of creating focused mitigation measures, it is vital to comprehend these contaminants. Below is an overview of the main categories and sources:

Types of Pollutants:

Oil Residues:

- Usually the result of spills, leaks, or incorrect disposal techniques;
- May accumulate as a thin layer on heat exchanger the surfaces, preventing heat transfer.

Chemical Contaminants:

- Result from runoff, cargo residues, and industrial wastes; Contain corrosive elements that hasten the deterioration of heat exchanger components.
- Could accumulate and reduce heat conductivity.

Debris:

- May cause friction and abrasion of heat exchanger surfaces.
- Contains solid particles including materials for plastics, debris, and organic debris.
- Gets into heat exchangers through the saltwater intake, possibly causing fouling and lowering efficiency.

Sources of Pollutants:

Ship exhaust:

- Particles and chemical compounds are released into the air and water by engine exhaust.
- Pollutant collection on heat exchanger surface can be facilitated by atmospheric deposition.

Industrial Operations:

- Chemical emissions from manufacturing operations can enter heat exchangers;
- emissions from industrial facilities add a variety of contaminants to open and coastal waterways.

Runoff and Urban Releases:

- Pollutants from highways, farms, and urban areas are carried into water bodies by rainfall runoff.
- Urban discharges contaminate coastal habitats with untreated wastewater and storm water.

Accidental leaks:

- Heat exchangers are directly at risk from oil leaks resulting from offshore drilling or shipping mishaps.

– Chemical spills can pollute seawater and have an impact on heat exchanger performance. Examples of these spills include cargo leaks.

Natural Sources:

– Particulates and gases can be released into the atmosphere by natural occurrences such as volcanic eruptions and wildfires.

– These organic sources add to the total amount of heat-exchangers surface fouling in marine habitats.

Creating efficient cleaning and maintenance plans requires an understanding of the makeup and source of these contaminants. Ship heat exchanger lifetime and efficiency may be increased while reducing environmental effect by the maritime sector by addressing the unique features of pollutants, whether via mechanical or chemical techniques.

The relationship between the buildup of pollutants and the decrease in thermal conductivity; Understanding the relationship between the buildup of pollutants and the decrease in thermal conductivity in ship heat exchangers is crucial to comprehending how heat-exchangers surface fouling affects these vital parts. Pollutant buildup on heat exchanger surface can reduce thermal conductivity by impeding the effective transmission of heat among the working fluid and the environment. Understanding this relationship is essential to creating focused remedies that preserve heat exchanger performance at its best. Here are some salient points about this relationship [9]:

1. Formation of Insulating Layers: pollutants, including chemicals, dirt, and oil residues, accumulate on the surfaces of heat exchangers. By acting as insulating barriers, these layers prevent heat from being transferred from the fluid moving in the exchanger to the surrounding area.

2. Risk of Overheating: The heat exchanger system is more susceptible to overheating when thermal conductivity drops. Overheating can have detrimental effects that jeopardize the vessel's safety and dependability, such as increased wear and even damage to engine components.

3. The correlation highlights the importance of routine cleaning and maintenance of shipboard heat exchangers to prevent and mitigate the negative effects of pollutant buildup. The goals of maintenance procedures are to eliminate pollutants, restore thermal efficiency, and extend the lifespan of the heat exchanger elements.

4. Quantitative Analysis: To study the association numerically, recent research has used both computer models and experimental experiments. Experimental studies involve testing in the real world, measuring thermal conductivity in controlled circumstances to validate theoretical predictions. Computer models simulate the impact of various kinds and amounts of pollutants on thermal conductivity, offering insights into the processes required.

Assessing the viability and efficiency of new cleansing techniques for ship heat exchangers is essential to finding workable solutions that not only deal with heat-exchangers surface fouling problems but also take the environment and economy into account (Table 1). This is a summary of the main elements of the assessment procedure [9; 10; 11].

Table 1

Marine Heat Exchanger Cleansing Techniques: A Comprehensive Viability and Efficiency Assessment for Environmental and Economic Sustainability

		Pros	Cons
Effectiveness Assessment	Robotic Cleaning System	Compared to traditional human techniques, automation reduces downtime and improves cleaning effectiveness and efficiency by accessing complicated configurations and tough regions. It also enables accurate cleaning without requiring substantial removal of heat exchanger elements.	The cost of the initial investment might be substantial; servicing and programming requirements should be taken into account.
	Chemical Cleaning agent	<ul style="list-style-type: none"> • Suitable for a variety of heat exchanger types; • Highly efficient in dissolving and eliminating different impurities without the need for mechanical intervention; • Formulated to be material-compatible and ecologically safety 	<ul style="list-style-type: none"> • Choosing the right cleaning products is essential; certain formulations may have an impact on the environment. • Waste management and chemical disposal need to be carefully considered.
		Robotic Cleaning Systems:	Chemical Cleaning Agents
Sustainability Considerations	Environmental Impact	<ul style="list-style-type: none"> • In general, robotic systems are less harmful to the environment than certain chemical cleaning products. • Reducing the use of hazardous chemicals helps maintain a sustainable ecosystem. 	<ul style="list-style-type: none"> • The transition to more environmentally friendly formulations reduce harmful impacts on marine environments. • Formulations that are non-toxic and biodegradable conform to sustainable principles.

	Resource Efficiency	By focusing on particular areas and eliminating needless cleaning, it is possible to maximize resource efficiency. Additionally, automated methods lessen the need for physical work, which helps conserve resources.	<ul style="list-style-type: none"> • Appropriate formulation and application guarantee effective elimination of pollutants, reducing the amount of chemicals needed. • It is crucial to take resource usage into account while producing chemical agents.
Economic Viability		<ul style="list-style-type: none"> • Long-term benefits from less downtime and improved cleaning efficiency may balance the expenses of the initial investment. • The scope of ship operations and the amount of required cleaning have an impact on cost-effectiveness. 	<ul style="list-style-type: none"> • It's important to take into account the costs of buying and discarding cleaning supplies. • Longer equipment lifespans and better heat exchanger performance can result in economic benefits.
Long-Term Maintenance Implications		Utilizing robotic devices on a regular basis can help with long-term maintenance planning and keep pollutants from building up. <ul style="list-style-type: none"> • It is important to keep an eye on and evaluate system performance on a regular basis. 	<ul style="list-style-type: none"> • Regular use of the right cleaning products helps reduce the long-term harm caused by a buildup of pollutants. • For extended efficacy, cleaning solutions' compatibility with heat exchanger components must be taken into account.

Source: author's own development

Improving the cleaning techniques for ship heat exchangers is essential to preserving maximum efficiency and reducing the environmental effect. Here are a few ideas for cleaning methods:

Automation and Robotics:

- Install robotic cleaning devices with sophisticated sensors and software.

- Give robots the freedom to move through complex heat exchanger systems for accurate and effective cleaning.

- Cut down on the amount of physical labor required and downtime.

Water Jets at High Pressure:

For mechanical cleaning, use water jets with high pressure.

- Eliminate contaminants efficiently while protecting the surfaces of the heat exchanger.

- Boost productivity and cut back on the usage of toxic cleaning supplies.

- Cleaning using ultrasonic:

Use ultrasonic cleaning techniques to get rid of impurities.

- Create tiny bubbles with high-frequency sound waves to disturb and loosen toxins.

- ideal for confined spaces and complex heat exchanger systems.

Cleaning brushes without abrasives:

- Create cleaning brushes that aren't harsh using cutting-edge materials.

- Scrub efficiently while avoiding damaging the heat exchanger plates or tubes.

- Incorporate with robotic systems to achieve accurate control.

Chemical Agents That Are Kind to the Environment:

- Investigate and create green cleaning products.

- Create substances that efficiently dissolve contaminants while having no negative effects on the environment.

- Think of non-toxic and biodegradable compositions.

Creative Designs for Heat Exchangers:

- Examine heat exchanger designs that are naturally impervious to the accumulation of pollutants.

- Improve the surface materials to prevent fouling and stickiness.

- Encourage the heat exchanger's internal self-cleaning systems.

Systems for Real-Time Monitoring:

- Install equipment for monitoring heat exchanger performance in real time.

- To measure surface fouling levels and efficiency, use sensors.

- Allow for proactive cleaning that isn't based on rigid timetables but rather on real circumstances.

Chemical cleaning chemicals that are employed on ship heat exchangers have the potential to pollute water, cause ecotoxicity, accumulate in the environment, modify the chemistry of the water, and be permanent. To mitigate this, the industry is moving toward ecologically friendly formulations, with a strong emphasis on closed-loop systems for responsible usage and regulatory compliance as well as biodegradability, non-toxicity, and green chemistry.

The effects of pollutants on ship heat exchangers and their practical significance

Pollutant influence on ship heat exchangers has a variety of practical implications, from maintenance costs and operational efficiency to environmental effects. It is imperative that the marine sector comprehends and tackles these ramifications to guarantee the dependable and enduring operation of ships. Here, we examine the application and consequences of the way contaminants impact ship heat exchangers [8; 12]:

1. Diminished Efficiency of Operations:

– Main Problem: Pollutants including chemicals, trash, and oil residues build insulating layers on heat exchanger surfaces, which prevents heat from being transferred efficiently.

– Practical Implication: to accomplish the needed heat exchange, more energy must be used since reduced thermal conductivity lowers operating efficiency. Ship operators suffer from increased fuel consumption and operating expenses as a result.

2. Elevated Risk of Overheating:

– Main Problem: The weakened heat transfer efficiency makes ship engines more susceptible to overheating.

– Practical Implication: Engine component integrity is directly jeopardized by overheating, which increases the risk of premature wear, malfunctions, and unscheduled downtime. Reducing this risk is essential to preserving the dependability and safety of ships.

3. Increased Maintenance Expenses:

– Main Problem: Damage caused by pollutants requires more regular and thorough repair.

– Practical Implication: Increased corrosion and damage on the heat exchanger components results in greater maintenance expenses for ship operators. These costs contribute to the total operating expenditure and include cleaning, repairs, and possible replacements.

4. Prolonged Rest Period for Cleaning:

– Main Problem: Manual involvement during traditional cleaning procedures may necessitate a large amount of downtime.

– Practical Implication: Schedules for vessels and operational effectiveness are adversely affected by prolonged downtime. The amount of time the ship is grounded for cleaning, the more of an economic hit it takes on trade routes and maritime businesses.

5. Environmental Impact:

• Main problem: Improper management of pollutants may have negative consequences for the marine ecosystem.

– Practical Implication: Heat-exchangers surface fouling of the environment might result from unintentional spills or poor cleaning techniques. Adherence to environmental standards is vital in order to avert legal results and preserve a favorable industry reputation.

6. Safety and Operational Reliability Issues:

– Key Issue: The dependability and security of ship operations are jeopardized by unchecked heat-exchangers surface fouling buildup.

– Practical Implication: Keeping timetables and fulfilling transportation obligations depend heavily on the dependability of boats. When crucial components are impacted by heat-exchangers surface fouling, safety concerns arise since this might result in maritime mishaps or disasters.

7. Effect on Equipment Lifespan Over Time:

– Main Problem: Heat exchanger components may have a shortened lifespan as a result of ongoing heat-exchangers surface fouling exposure.

– Practical Implication: Early corrosion and wear may necessitate more frequent replacements, raising the upfront costs for vessel owners. Heat exchanger lifespan must be taken into account for fleet management to be both economical and sustainable.

8. Regulatory Compliance:

– Main Concern: The marine industry’s cleaning and heat-exchangers surface fouling discharge procedures are subject to strict environmental rules.

– Practical Implication: In order to comply with these laws, ship operators must implement eco-friendly cleaning techniques and technology. There may be penalties, fines, and negative publicity for noncompliance.

An advanced device called the Automated Robotic Cleaning Module is intended to clean ship heat exchangers effectively and independently. It consists of many fundamental components:

Cameras and Sensors:

– advanced sensors for real-time environmental sensing, such as cameras and proximity sensors.

– gives the robot the ability to go through intricate heat exchanger layouts and locate spots that need maintenance.

Modular attachments:

– Adaptable cleaning attachments to accommodate a range of heat exchanger configurations.

– modules designed to specialize in different kinds of pollutants, guaranteeing thorough cleaning.

Navigation that can be programmed:

– Accurate programming skills for self-navigating systems.

– pathways for cleaning that may be altered, enabling the robot to adjust to different heat exchanger shapes.

Superior Efficiency Motors:

– Strong and effective motors for accurate attachment operation and movement.

– guarantees the best possible cleaning power and flexibility to various surface materials.

Wireless Interaction:

– Wireless connectivity that is integrated for data transfer and remote control.

– allows for real-time monitoring and modification, increasing operational effectiveness.

System for Avoiding Collisions:

– makes use of sophisticated algorithms to prevent collisions.

– guarantees the robot’s safe navigation in confined areas and complex heat exchanger designs.

Energy-Saving Architecture:

– integrates systems and parts that use less energy for extended operation.

– Effective power control to increase cleaning duration and coverage.

Interface User:

– Simple user interface for monitoring and operating remotely.

– gives operators the ability to monitor cleaning progress, make changes in real time, and get updates on the state of the system.

Pollutant development on heat exchanger walls is impacted by a number of variables, including vessel activity, operational circumstances, and water quality. Growth rates vary, but in marine environments, constant contact to contaminants and saltwater can

cause them to occur rather quickly. When a visible coating of impurities reduces heat exchanger performance, routine cleaning is recommended. The frequency is determined by variables such as water quality, vessel utilization, and the efficiency of surface fouling control methods.

It is essential to develop real-time monitoring systems in order to regulate pollutants during operation. Regularly assess surface fouling levels and efficiency with sensors. Take preventative action by using robotic cleaning that is automated to stop excessive accumulation. Remainders may be collected by setting up closed-loop filtering systems, and using green chemical techniques reduces environmental effect. To guarantee effective heat exchanger performance, optimal management necessitates striking a balance between environmental responsibility, operational needs, and proactive maintenance.

Given the variety of ship power plants and the range of pollutants connected with each kind, choosing certain heat exchanger types is undoubtedly an intelligent decision. For example:

Heat exchangers with shell and tubes:

- They are frequently used in maritime applications, however they can become fouled by biological growth and detritus.
- Think of automated robotic cleaning systems equipped with brushes for effectively targeting the exterior and inner surfaces of tubes.

Heat exchangers on plates:

- prone to scale from saltwater salts and clogging from particles
- Use high-pressure water jet systems to clean mechanically, paying special attention to keeping plates apart for best results.

Heat exchangers that run on air:

- susceptible to dust buildup and flying debris, which reduces cooling effectiveness.
- For accurate cleaning that doesn't harm finned surfaces, use automated robotic cleaning with air-assisted nozzles.

Heat exchangers with fins:

- prone to corrosion and fouling, particularly in settings high in salt.
- Use high-pressure water jet systems in conjunction with chemical cleaning solutions designed to prevent corrosion.

Selecting certain heat exchanger types enables a focused and customized approach to cleaning techniques, guaranteeing the most effective and effective elimination of contaminants while reducing the risk of equipment damage.

Conclusion

In conclusion, the marine sector has to give the effect of heat-exchangers surface fouling on the functioning of ship heat exchangers immediate attention that not much found on the literature. The development of efficient cleaning techniques becomes critical as long as contaminants continue to jeopardize the effectiveness of these vital components. In the heat-exchangers surface fouling issues, maintaining the lifetime and optimum operation of ship heat exchangers requires striking an equilibrium among the environment and operational efficiency.

In short, the connection between the buildup of pollutants and the loss of thermal conductivity highlights the need of taking proactive actions to tackle heat-exchangers surface fouling-related issues in ship heat exchangers. A thorough comprehension of this

relationship guides the creation of efficient cleaning techniques and maintenance plans, guaranteeing the continued dependability and efficiency of ship engines in the context of growing heat-exchangers surface fouling issues.

Recent cleansing methods for ship heat exchangers are evaluated by doing a thorough examination of their long-term maintenance implications, economic viability, sustainability, and efficacy. In the overall scheme of heat-exchangers surface fouling control, making well-informed decisions that support the objectives of the marine sector requires an integrated strategy that considers both the effects on the environment and operational effectiveness.

Beyond technical concerns, the practical complications of pollutant effect on ship heat exchangers include financial, ecological, and safety factors. In order to minimize these effects and guarantee the ongoing effectiveness and dependability of marine operations, it is imperative that proactive maintenance procedures, cutting-edge cleaning technologies, and regulatory compliance be followed.

Using sensor technology, flexibility, and intuitive user interfaces, the Automated Robotic Cleaning Module is a state-of-the-art system that maximizes ship heat exchanger cleaning effectiveness and efficiency while reducing human involvement and downtime.

BIBLIOGRAPHY

1. A Review of Biofouling of Ships' Internal Seawater Systems / I. Davidson et al. *Frontiers in Marine Science*. 2021. Vol. 8. URL: <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.761531> (date of access: 09.12.2023).
2. A conceptual framework for waste heat recovery from compression ignition engines: Technologies, working fluids & heat exchangers / O. Douadi et al. *Energy Conversion and Management: X*. 2022. Vol. 16. P. 100309. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100309> (date of access: 09.12.2023).
3. A recent review on waste heat recovery methodologies and applications: Comprehensive review, critical analysis and potential recommendations / O. Farhat et al. *Cleaner Engineering and Technology*. 2022. Vol. 6. P. 100387. URL: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100387> (date of access: 09.12.2023).
4. ICES Viewpoint background document: Impact from exhaust gas cleaning systems (scrubbers) on the marine environment (Ad hoc) / I.M. Hassellöv et al. *ICES Scientific Reports*. 2020. 2:86. 40 p. <http://doi.org/10.17895/ices.pub.7487>.
5. Thermal design and analysis of an organic rankine cycle system utilizing the main engine and cargo oil pump turbine based waste heats in a large tanker ship / O. Konur et al. *Journal of Cleaner Production*. 2022. P. 133230. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133230> (date of access: 09.12.2023).
6. Analysis of Removing Barnacles Attached on Rough Substrate with Cleaning Robot / C. Li et al. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020. Vol. 8, no. 8. P. 569. URL: <https://doi.org/10.3390/jmse8080569> (date of access: 09.12.2023).
7. Lion S., Vlaskos I., Taccani R. A review of emissions reduction technologies for low and medium speed marine Diesel engines

- and their potential for waste heat recovery. *Energy Conversion and Management*. 2020. Vol. 207. P. 112553. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112553> (date of access: 09.12.2023).
8. An advanced marine engine waste heat utilization scheme: Electricity-cooling cogeneration system integrated with heat storage device / T. Ouyang et al. *Energy Conversion and Management*. 2021. Vol. 235. P. 113955. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.113955> (date of access: 09.12.2023).
 9. Peter O., Mohamed A., Emmanuel V., & Tochukwu N. Corrosion effects on low carbon steel marine heat exchanger. *International Journal of Advanced Science and Technology*. 2020. Vol. 29(7). P. 10066-10072.
 10. Hornbill: A Self-Evaluating Hydro-Blasting Reconfigurable Robot for Ship Hull Maintenance / V. Prabakaran et al. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 193790–193800. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2020.3033290> (date of access: 09.12.2023).
 11. Design and analysis of a wheel-leg compound variable curvature ship hull cleaning robot / B. Wang et al. *Ocean Engineering*. 2022. Vol. 266. P. 112755. URL: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112755> (date of access: 09.12.2023).
 12. Yang Z., Korobko V., Radchenko M., & Radchenko R. Improving Thermoacoustic Low-Temperature Heat Recovery Systems. *Sustainability*. 2022. Vol. 14(19). P. 12306.

REFERENCES

1. Davidson, I., Cahill, P., Hinz, A., Kluza, D., Scianni, C., & Georgiades, E. (2021). A review of biofouling of ships' internal seawater systems. *Frontiers in Marine Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.761531>.
2. Douadi, O., Ravi, R., Faqir, M., & Essadiqi, E. (2022). A conceptual framework for waste heat recovery from compression ignition engines: Technologies, working fluids & heat exchangers. *Energy Conversion and Management: X*, 16(100309), 100309. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100309>
3. Farhat, O., Faraj, J., Hachem, F., Castelain, C., & Khaled, M. (2022). A recent review on waste heat recovery methodologies and applications: Comprehensive review, critical analysis and potential recommendations. *Cleaner Engineering and Technology*, 6(100387), 100387. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100387>.
4. Hassellöv, I.M., Koski, M., Broeg, K., Marin-Enriquez, O., Tronczynski, J., Dulière, V., Murray, C., Bailey, S., Redfern, J., de Jong, K., Ponzevera, E., Belzunce-Segarra, M.J., Mason, C., Iacarella, J.C., Lyons, B., Fernandes, J.A. and Parmentier, K. (2020). ICES Viewpoint background document: Impact from exhaust gas cleaning systems (scrubbers) on the marine environment (Ad hoc). *ICES Scientific Reports*. 2:86. 40 p. <http://doi.org/10.17895/ices.pub.7487>.
5. Konur, O., Yuksel, O., Korkmaz, S. A., Colpan, C. O., Saatcioglu, O. Y., & Muslu, I. (2022). Thermal design and analysis of an organic rankine cycle

- system utilizing the main engine and cargo oil pump turbine based waste heats in a large tanker ship. *Journal of Cleaner Production*, 368(133230), 133230. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133230>.
6. Li, C., Wang, G., Chen, K., Jia, P., Wang, L., Wang, X., & Yun, F. (2020). Analysis of removing barnacles attached on rough substrate with cleaning robot. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(8), 569. <https://doi.org/10.3390/jmse8080569>.
 7. Lion, S., Vlaskos, I., & Taccani, R. (2020). A review of emissions reduction technologies for low and medium speed marine Diesel engines and their potential for waste heat recovery. *Energy Conversion and Management*, 207(112553), 112553. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112553>.
 8. Ouyang, T., Wang, Z., Zhao, Z., Lu, J., & Zhang, M. (2021). An advanced marine engine waste heat utilization scheme: Electricity-cooling cogeneration system integrated with heat storage device. *Energy Conversion and Management*, 235(113955), 113955. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.113955>.
 9. Peter, O., Mohamed, A., Emmanuel, V., & Tochukwu, N. (2020). Corrosion effects on low carbon steel marine heat exchanger. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 29(7), 10066–10072.
 10. Prabakaran, V., Vu Le, A., Kyaw, P. T., Mohan, R. E., Kandasamy, P., Nguyen, T. N., & Kannan, M. (2020). Hornbill: A self-evaluating hydro-blasting reconfigurable robot for ship hull maintenance. *IEEE Access: Practical Innovations, Open Solutions*, 8, 193790–193800. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3033290>.
 11. Wang, B., Ni, Z., Shen, Y., Zhang, S., Shen, Q., & Niu, X. W. (2022). Design and analysis of a wheel-leg compound variable curvature ship hull cleaning robot. *Ocean Engineering*, 266(112755), 112755. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112755>.
 12. Yang, Z., Korobko, V., Radchenko, M., & Radchenko, R. (2022). Improving Thermoacoustic Low-Temperature Heat Recovery Systems. *Sustainability*, 14(19), 12306.

КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ВПЛИВУ РОЗМІРНОЇ МОДЕРНІЗАЦІЇ НА ХОДОВІСТЬ І ПРОПУЛЬСИВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРУЇЗНИХ СУДЕН

О.М. Шуило

к.т.н., професор кафедри суднових енергетичних установок та технічної експлуатації,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0003-0574-1951

Анотація

Вступ. Важливим напрямом для підвищення конкурентної спроможності судноплавних компаній, які здійснюють морський круїзний бізнес, є модернізація суден. Для пасажирських суден характерно, що протягом їх життєвого циклу модернізація корпусу проходить у декілька етапів. До того ж модернізується архітектура приміщень і обладнання. З огляду на значну вартість таких суден це суттєво подовжує роки й ефективність їх експлуатації. Модернізація є ефективним системним рішенням щодо зменшення фізичного і морального старіння суднової техніки. Передовим способом збільшення пасажиромісткості круїзного судна є збільшення його розмірів. Найбільша пасажиромісткість досягається у разі збільшення довжини судна, зокрема додаванням циліндричної вставки в районі мідель-шпангоуту.

Збільшення довжини судна з додаванням циліндричної вставки призведе до зміни режимів навантаження і роботи не тільки корпусу, але і гвинто-рульового комплексу, головного двигуна і суднової електроенергетичної системи в цілому.

Оцінка ходовості і пропульсивних якостей судна є важливою задачею під час проведення математичного моделювання щодо оптимізації розмірів додаткової циліндричної вставки. **Мета** – провести комплексну оцінку впливу розмірної модернізації на ходовість і пропульсивні характеристики круїзних суден.

Результати. Проведено дослідження буксирувального опору судна залежно від довжини циліндричної вставки з використанням методів залишкового або хвильового опору на прикладі електроходів “Pride of America” і “Seabourn Odyssey”, за результатами якого визначено залежність між збільшенням довжини судна і буксирувальним опором у відносних координатах.

Поряд з буксирувальним опором на пропульсивні характеристики судна впливають пропульсивний коефіцієнт і коефіцієнти гідродинамічної взаємодії, у зв'язку з чим проведено кількісну і якісну оцінку цих коефіцієнтів, яка пов'язана з довжиною модернізованого судна.

Висновки. Запропоновано нову форму рівняння ходовості, що відображається у відносних одиницях, що дозволяє встановлювати залежність між пропульсивною потужністю і величиною подовження судна.

Ключові слова: пасажирське судно, розмірна модернізація, буксирувальний опір, ходовість, пропульсивні характеристики, циліндрична вставка.

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE IMPACT OF DIMENSIONAL
MODERNIZATION ON THE PERFORMANCE AND PROPULSION
CHARACTERISTICS OF CRUISE SHIPS

O.M. Shumylo

PhD in Engineering, Professor at the Department of Ship Power Plants
and Technical Operation,
Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0003-0574-1951

Summary

It is directly important to improve the competitiveness of shipping companies that operate maritime cruise business and the modernization of vessels. It is typical for passenger ships that, throughout their life cycle, several stages are carried out with the modernization of the hull, the architecture of the premises and the equipment, the safety and quality of such ships – which ultimately leads to a longer lifespan activity of their operation. Modernization involves effective system solutions to change the physical and moral obsolescence of ship equipment. An advanced way to increase the passenger capacity of a cruise ship is to increase its size. The greatest passenger capacity is achieved by increasing the vessel's weight, and by adding a cylindrical insert in the area of the mid-frame.

Increasing the length of the ship with the addition of a cylindrical insert will lead to a change in the load and operation modes of not only the hull, but also the propeller-rudder complex, the main engine and the ship's electrical power system as a whole.

Assessment of the ship's maneuverability and propulsive qualities is an important task when conducting mathematical modeling to optimize the dimensions of the additional cylindrical insert.

A study of the towing resistance of the vessel depending on the length of the cylindrical insert was carried out using the methods of residual or wave resistance on the example of the electric ships "Pride of America" and "Seabourn Odyssey", according to the results of which the dependence between the increase in the length of the vessel and the towing resistance was determined in relative coordinates.

Along with the towing resistance, the propulsive characteristics of the ship are affected by the propulsive coefficient and coefficients of hydrodynamic interaction, in connection with which a quantitative and qualitative assessment of these coefficients, which is related to the length of the modernized vessel, was carried out.

A new form of the maneuverability equation is proposed, displayed in relative units, which allows establishing the relationship between the propulsive power and the length of the vessel.

The estimated propulsive power and power of the main engines were evaluated to ensure the operational speed of the vessel with the determination of the limit length of the cylindrical insert.

Key words: *passenger ship, dimensional modernization, towing resistance, maneuverability, propulsive characteristics, cylindrical insert.*

Постановка проблеми і огляд літератури. В індустрії туристичних перевезень за останні чверть століття сформувався стійкий тренд щодо зростання морських круїзів, що спонукало відповідні компанії замовляти виробництво нових суден і проводити модернізацію наявного флоту [1–3].

Модернізація круїзних суден проходить декількома напрямками [4]: реновація корпусу, конверсія, переобладнання судових інженерних систем і комплексів і переобладнання внутрішньосуднової архітектури. Протягом життєвого циклу більшість суден проходить модернізацію за цими напрямками. На особливу увагу серед них заслуговує конверсія, яка включає: заміну призначення судна, збільшення розмірів судна, будівництво нових і ремонт наявних суден із застосуванням частин старих суден. З огляду на необхідність збільшити пасажиромісткість суден застосовується конверсія з подовженням розмірів суден. Як зазначалось в роботі [5], найбільшою економічною ефективністю володіє саме збільшення довжини корпусу за рахунок додавання циліндричної вставки.

Слід також наголосити на сучасних вимогах щодо забезпечення екологічності морських суден, які регламентуються нормативними документами Міжнародної морської організації – Конвенцією по охороні навколишнього середовища SOLAS-74 з поправками, резолюцією комітету з охорони навколишнього середовища. Ці вимоги стають все жорсткішими. Зокрема, були введені обмеження на допустимі норми викидів в атмосферу речовин-забрудників. Водночас додаються обмеження щодо викидів парникових газів (Green House Gas), які вноормовуються відповідними резолюціями комітету ІМО з охорони навколишнього середовища.

Економічність і екологічність роботи судових енергетичних установок є пов'язаними категоріями, оскільки раціональне споживання палива зменшує кількість як шкідливих речовин (оксидів сірки – SO_x , азоту – NO_x , сажі), так і парникових газів (діоксид вуглецю – CO_2). Майже половина згенерованої на пасажирському судні енергії витрачається на пропульсивну потужність, яка забезпечує рух судна з заданою швидкістю. Ефективність використання цієї потужності характеризується відповідною морехідною характеристикою – ходовістю. Під ходовістю в морській практиці традиційно розуміється можливість судна розвивати і забезпечувати встановлену швидкість ходу за найменшого значення потужності головних двигунів. Забезпечення раціональних показників ходовості при модернізації суден дозволить досягти характеристик економічності й екологічності, які відповідають найкращим галузевим оцінкам.

Стан досліджуваного питання. Наведена задача щодо забезпечення ходовості морських суден на етапі проектування знаходилась перманентно в центрі уваги дослідників, починаючи з того часу, коли судові енергетичні установки були запроваджені на морському та річковому транспорті. Сучасні методи оцінки ходовості базуються на фундаментальних дослідженнях широкого кола науковців – Л.М. Ногіда, В.В. Ашіка, А.В. Броннікова, Д. Холтропа, Ю.М. Кулібанова та інших [4; 6–16; 18–19]. Усі запропоновані методи мали різноманітну точність і високе розсіювання результатів, які не відрізнялись відповідною універсальністю. Такі результати не можуть в рівній мірі застосовуватись для різних типів суден, їх конструктивних особливостей і експлуатаційних режимів. Слід звернути увагу на те, що вперше ходовість при розмірній модернізації була досліджена

в роботі А.А. Гундобіна і Г.Н. Фінкеля [18], які застосовували методи повної потужності (формули Давидова, Ногіда). Такі методи показали низьку точність визначення пропульсивної потужності. Як показав досвід проектування [14–18], зазначені методи можуть застосовуватись лише на попередніх етапах.

Формування цілей статті. Метою дослідження є оцінка пропульсивних характеристик пасажирських суден під час проведення розмірної модернізації зі збільшенням довжини судна з урахуванням функціонування системи «рушій – корпус – суднова енергетична установка».

Виклад основного матеріалу. Для реалізації техніко-експлуатаційних і техніко-економічних характеристик морських круїзних суден під час їх розмірної модернізації вкрай необхідно провести дослідження щодо визначення впливу збільшення довжини судна на характеристики пропульсивного комплексу, що визначають таку важливу властивість судна, як ходовість. Ходовість судна як фундаментальна характеристика морехідних якостей судна, що забезпечує його рух з необхідною швидкістю за мінімального значення потужності, яку розвивають головні двигуни, описується однойменним рівнянням (рівнянням ходовості):

$$P_{prop} = \frac{R_E v}{\eta_{prop} \eta_e \eta_{red}} = 0,514 \frac{R_E v_s}{\eta_{prop} \eta_e \eta_{red}} \leq z P_{ME}, \quad (1)$$

де P_{prop} – пропульсивна розрахункова потужність для забезпечення руху судна зі встановленою швидкістю, кВт;

v – швидкість судна, м/с;

v_s – швидкість судна, вузли;

η_e – коефіцієнт корисної дії, що враховує втрати енергії в підшипниках валопроводу;

η_{red} – коефіцієнт корисної дії, що враховує втрати енергії в редукторі.

R_E – опір руху судна в експлуатації, кН;

P_{ME} – номінальна (паспортна) потужність головних (тягових) двигунів (у морських круїзних лайнерах переважно застосовуються електричні двигуни), кВт;

z – кількість головних двигунів;

η_{prop} – пропульсивний коефіцієнт судна.

Рівняння (1) визначає вплив гідромеханічного комплексу судна на ефективність витрат потужності через опір руху судна в експлуатації R_E і пропульсивний коефіцієнт η_{prop} .

Визначення ходовості ґрунтується на дослідженні опору судна в експлуатації R_E і його складової – опору судна – зі свіжо фарбованим корпусом за умови прийнятно-здатних випробувань R . Опір R розраховується як сума складників [18]:

$$R = R_F + R_{vp} + R_w + R_{Ap} + R_A + R_{AA}, \quad (2)$$

де R_F – опір тертя, кН;

R_{vp} – опір форми, кН;

R_w – хвильовий опір, кН;

R_{Ap} – опір виступних частин корпусу, кН;

R_A – опір шорсткостей, кН;

R_{AA} – повітряний опір, кН.

Ґрунтуючись на теорії гідродинамічної подібності і моделювання руху судна, розрахуємо опір за класичним рівнянням [18]:

$$R = C \frac{\rho v^2}{2} \Omega, \quad (2)$$

де C – безрозмірний коефіцієнт буксирного опору, кН;

ρ – густина морської води, кг/м³;

v – швидкість судна, м/с;

Ω – площа змоченої поверхні, м².

Безрозмірний коефіцієнт C залежить від розмірів і форми корпусу, чисел Фруда (Fr) і Рейнольдса (Re) та містить в собі складові, аналогічні до рівняння (1) [18].

$$C = C_F + C_{VP} + C_W + C_{AP} + C_A + C_{AA}, \quad (3)$$

де C_F – коефіцієнт опору тертя;

C_{VP} – коефіцієнт опору форми;

C_W – коефіцієнт хвильового опору;

C_{AP} – коефіцієнт опору виступних частин корпусу;

C_A – коефіцієнт опору шорсткостей;

C_{AA} – коефіцієнт повітряного опору.

У сучасній розрахунковій практиці коефіцієнт тертя визначається за таким виразом [18]:

$$C_F = C_{F0} + C_{FC}, \quad (4)$$

де C_{F0} – коефіцієнт опору еквівалентної гладкої пластини;

C_{FC} – добавка до C_{F0} , яка дозволяє враховувати просторовий характер обтікання корпусу судна, тобто переводить тертя гладкої пластини до тертя просторового тіла (корпусу). Зазвичай ця добавка становить $C_{FC} \leq 0,05C_{F0}$ [18].

Якщо в рівняннях (3) і (4) виокремити коефіцієнт C_W , коефіцієнт опору форми C_{VP} і добавку C_{FC} , то отримаємо коефіцієнт залишкового опору:

$$C_R = C_{VP} + C_W + C_{FC}. \quad (5)$$

Це дає можливість формулу (3) перетворити до вигляду:

$$C = C_{F0} + C_R + C_{AP} + C_A + C_{AA}. \quad (6)$$

Існує достатня кількість методів, що дозволяють визначити площу в межах 2...4%, розрахованих за теоретичними кресленнями судна, серед яких для морських транспортних і пасажирських суден заслуговує на увагу формула В. Семєки, яка тісно корелюється з практичними розрахунками площі Ω і подається у такому вигляді [18]:

$$\Omega = 1,03 LT \left(2 + 1,37(C_b - 0,274) \frac{B}{T} \right), \quad (7)$$

де L, B – довжина і ширина судна, м;

C_b – коефіцієнт повноти корпусу.

Універсального методу розрахунку буксирного опору поки що не створено, адже всі ці методи мають різноманітне розсіювання похибок. Нині широке розповсюдження отримали методи наближеного розрахунку буксирного опору, які ґрунтуються на результатах випробувань великої кількості моделей і реальних суден конкретного типу [18].

У новітній практиці проектування суден використовуються три основні групи методів розрахунку буксирного опору [18]:

– повного опору або потужності;

- залишкового опору або хвильового опору;
- перерахунку залишкового опору з прототипу.

Методи, що утворюють першу групу (Папмеля, Ейра, адміралтейських коефіцієнтів, Дайсона та інші), володіють найменшою точністю і зазвичай застосовуються на початку проектування. До другої групи відносять серію досліджень Японської суднобудівної асоціації, Інституту суднобудування (Токіо), Тейлора та інші, які мають високу точність щодо результатів натурних експериментів. Третя група (Гірса, Дубровіна) поєднує методи випробувань суден з близькими значеннями обводів між прототипом і судном, що проектується [18].

Для визначення коефіцієнта буксирувального опору використаємо дослідження, що ґрунтуються на методах другої групи, для яких характерне застосування розділення опору корпусу на опір тертя і залишкове тертя, що кількісно відображається коефіцієнтом:

$$C_R = C_R(C_b)k_{L/B}k_{T/B}, \quad (8)$$

де $C_R(C_b)$ – значення коефіцієнта залишкового опору судна-прототипу стандартної серії [18], який визначається за конкретними значеннями коефіцієнта повноти C_b і числа Фруда;

$k_{L/B}$ – коефіцієнт впливу невідповідності відношення L/B для судна, яке модернізується, і судна стандартної серії пасажирських суден;

$k_{T/B}$ – коефіцієнт впливу невідповідності відношення T/B для судна, яке модернізується, і судна стандартної серії пасажирських суден.

З огляду на турбулентний характер (режим) руху рідини навколо еквівалентної по відношенню до змоченої поверхні проектного судна обґрунтовано застосування формули Прандля-Шліхтинга [18]:

$$C_{F0} = \frac{0,455}{(\lg Re)^{2,58}}, \quad (9)$$

де Re – число Рейнольдса, $Re = \frac{vL}{\nu}$;

v – швидкість судна, м/с;

ν – кінематична в'язкість морської води, $\nu = 1,61 \cdot 10^{-6}$ м²/с;

L – довжина судна, м.

Для визначення величини надбавок C_A , що враховують опір шорсткостей, і коефіцієнтів опору виступних частин C_{AP} використано рекомендації, подані у табл. 1,4. і табл. 1,5 [18]. Коефіцієнт впливу опору повітря вибирається згідно з рекомендаціями [18].

Оцінка впливу збільшення довжини судна:

$$L = L_0 + \Delta L,$$

де L_0 – початкова довжина судна, м;

ΔL – розмір циліндричної вставки, на яку збільшиться судно, м.

Таку оцінку проведемо, спираючись на викладений попередньо метод, для круїзних суден, що є перспективними і бізнес-привабливими кандидатами для проведення робіт з розмірної модернізації:

– “Pride of America” (2005 р., ІМО номер 9209221), довжина $L=287,49$ м, довжина між перпендикулярами $L_{bp}=259,1$ м, ширина $B=32,2$ м, осадка $T=8,0$ м, гростонаж $GT=80439$ gt, водотоннажність $V=454000$ т.

– “Seabourn Odyssey” (ІМО номер 9417086), довжина $L=198,15$ м, довжина між перпендикулярами $L_{bp}=169,1$ м, ширина $B=26,0$ м, осадка $T=6,6$ м, гростонаж $GT=31650$ gt, водотоннажність $V=10000$ т.

Дослідження буксирувального опору R із застосуванням розглянутого методу здійснювалось для даних суден, на прикладі яких пропонується провести модернізацію.

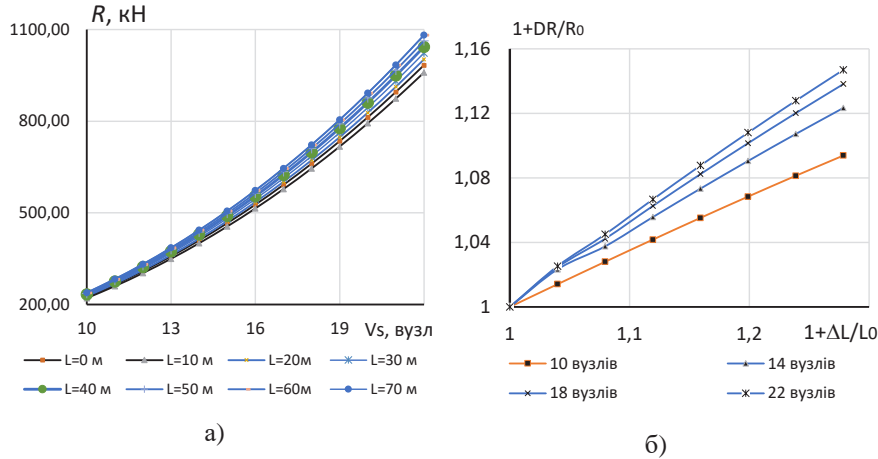


Рис. 1. Результати дослідження:

- а) буксирувального опору R лайнера “Pride of America” при його подовженні
 б) відносного буксирувального опору $\bar{R} = 1 + \Delta R / R_0$ лайнера “Pride of America” залежно від зростання його відносної довжини $\bar{L} = 1 + \Delta L / L_0$.

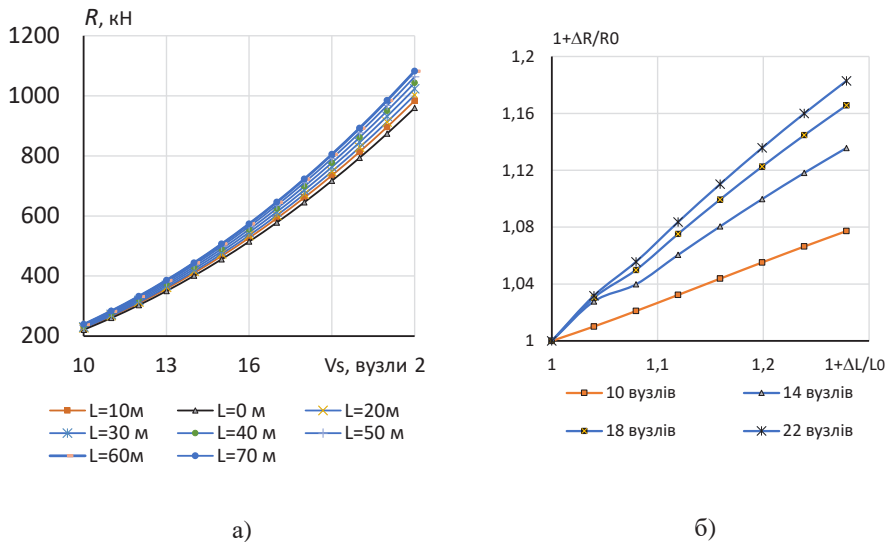


Рис. 2. Результати дослідження:

- а) буксирувального опору R лайнера “Seabourn Odyssey” при його подовженні на величину вставки;
 б) відносного буксирувального опору $\bar{R} = 1 + \Delta R / R_0$ лайнера “Seabourn Odyssey” залежно від зростання його відносної довжини $\bar{L} = 1 + \Delta L / L_0$.

З наведених графіків випливає, що на швидкостях судна 10...14 вузлів довжина з конкретною вставкою не має істотного впливу на загальний опір судна. З підвищенням швидкості від 16 до 22 вузлів вплив збільшення довжини судна стає помітним: опір збільшується на 150 кН і 100 кН відповідно (рис. 1 А і рис. 2 Б), що зумовлюється збільшенням опору тертя R_F і хвильового опору R_W .

Поряд з представленням результатів розрахунків опору R в звичайному форматі в абсолютних значеннях рис. 1 Б і рис. 2 Б доцільно додатково дослідити вплив збільшення довжини судна $\bar{L} = 1 + \Delta L / L_0$ на збільшення буксирувального опору $\bar{R} = 1 + \Delta R / R_0$ у відносних координатах, де ΔR – приріст сили опору, R_0 – початкове значення опору, що відповідає довжині судна до подовження L_0 . Графіками рис. 1 Б і рис. 2 Б проілюстровано, що при швидкості ходу 22 вузли подовження судна (в чисельнику “*Pride of America*”, в знаменнику “*Seabourn Odyssey*”) на:

- 5% призведе до збільшення опору на $\bar{R} = 1 + \Delta R / R_0$ на 2,5% / 3,9%;
- 10% – зростання опору на $\bar{R} = 1 + \Delta R / R_0$ на 5,5% / 6,9%;
- 15% – зростання опору на $\bar{R} = 1 + \Delta R / R_0$ на 8% / 10%;
- 20% – зростання опору на $\bar{R} = 1 + \Delta R / R_0$ на 11% / 14%;
- 25% – зростання опору на $\bar{R} = 1 + \Delta R / R_0$ на 13,5% / 16,5%;
- 27% – зростання опору на $\bar{R} = 1 + \Delta R / R_0$ на 15,0% / 18%.

Зі збільшенням швидкості судна у структурі повного опору згідно з рівнянням (2) зростає частка хвильового опору при синхронному зменшенні в’язкісного [21].

Гідродинамічна ефективність пропульсивного комплексу відповідно до рівняння (1) визначається пропульсивним коефіцієнтом η_{prop} , тому важливо провести дослідження, які дадуть можливість оцінити зміни цього коефіцієнта залежно від збільшення довжини судна $\bar{L} = 1 + \Delta L / L_0$.

Пропульсивний коефіцієнт η_{prop} , тобто коефіцієнт корисної дії пропульсивного комплексу, що вказує на ефективність витрати енергії в ньому, розраховується за відомою залежністю:

$$\eta_{prop} = \eta_k \eta_{es}, \quad (10)$$

де η_k – коефіцієнт впливу корпусу;

η_{es} – ККД гребного гвинта у вільній воді.

На додаткову увагу заслуговують складники рівняння (10) – ККД гребного гвинта у вільній воді і коефіцієнт впливу корпусу, оскільки вони зазнають впливу збільшення довжини судна, хоча і неопосередковано. Це зумовлює проведення аналізу.

Коефіцієнт впливу корпусу η_k з відповідним ступенем точності моделює складний характер гідродинамічної взаємодії корпусу, гвинта та двигуна і визначається рівнянням [16; 18]:

$$\eta_k = \frac{1}{i_0} \frac{1-t}{1-W_t}, \quad (11)$$

де i_0 – коефіцієнт впливу неоднорідності попутного потоку, що приймається як $i_0 = 1$ [18];

t – коефіцієнт засмоктування;

W_t – коефіцієнт розрахункового попутного потоку.

Як свідчить конструкторська і дослідницька практика проектування транспортних і пасажирських суден при визначенні коефіцієнтів гідродинамічної взаємодії

η_k , t , W_i і i_Q , їх отримують за даними випробувань, що здійснюються в дослідних басейнах [18]. На стадії проектування або модернізації можна застосовувати залежності, отримані за результатами статистичної обробки великої кількості дослідних даних серії моделей різних типів суден. Для транспортних і пасажирських суден з двома гвинтами вираз для визначення коефіцієнта W_i має такий вигляд [18]:

$$W_i = 0,09 + 0,14(C_b - 0,50), \quad (12)$$

де C_b – коефіцієнт повноти корпусу судна.

У роботі [4] проведені ґрунтовні дослідження щодо впливу зміни довжини судна на геометричні коефіцієнти корпусу. Використовуючи дану методику, визначимо закономірність зміни коефіцієнтів C_b на прикладі згаданих суден (рис. 3).

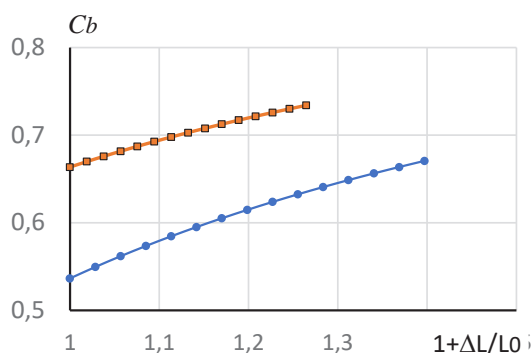


Рис. 3. Залежність коефіцієнта повноти корпусу C_b від зміни відносної довжини судна (для судна “Pride of America” – верхній графік, для судна “Seabourn Odyssey” – нижній графік)

З огляду на дослідження, відображене на рис. 3, розраховано за формулою (12) значення коефіцієнтів W_i і \bar{W}_i (коефіцієнт відносного зростання) при подовженні суден (для лайнера “Pride of America” W_i зростає в 1,08 раза, для лайнера “Seabourn Odyssey” – в 1,2 раза).

Для визначення коефіцієнта засмокування використовується така формула:

$$t = 0,15 + 0,53(C_b - 0,50) + 0,55(K_{DE} - 2), \quad (13)$$

де K_{DE} – коефіцієнт навантаження гребного гвинта за тягою, що розраховується за широковідомою рівністю:

$$K_{DE} = v D_{zg} \sqrt{\frac{\rho}{T_E}},$$

де D_{zg} – діаметр гвинта, м;

ρ – густина морської води, кг/м³;

T_E – тяга гвинта, кН; $T_E = k_E R / z_{zg}$,

k_E – експлуатаційна надбавка, яка для пасажирських суден складає 1,15.

R – буксирувальний опір, що визначається за діаграмами, зображеними на рис. 1 і рис. 2.

Значення тяги гвинта T_E , що змінюється при подовженні електрохода “*Pride of America*”, знаходиться в інтервалі від 551 кН до 632 кН і відповідно коефіцієнт тяги K_{DE} – від 2,730 до 2,549; для електрохода “*Seabourn Odyssey*” це виглядає таким чином: T_E – від 282,5 кН до 334,1 кН і коефіцієнт тяги K_{DE} – від 2,929 до 2,693.

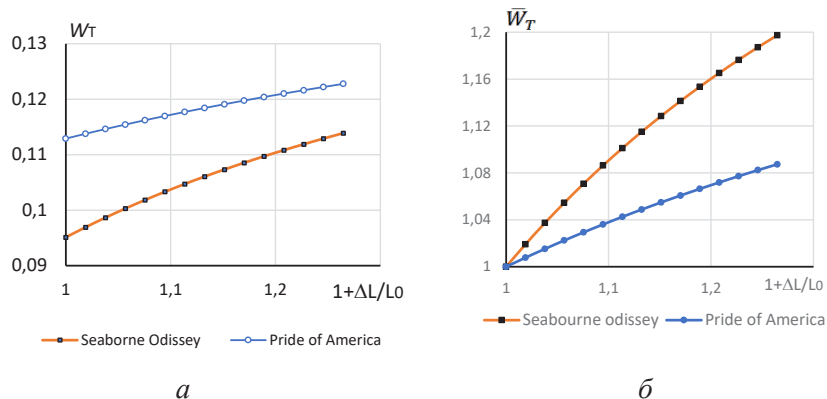


Рис. 4. Вплив подовження суден на коефіцієнт розрахункового попутного потоку: абсолютне значення – А); відносне значення – Б).

Аналіз розрахунків коефіцієнту засмоктування t (рис. 5) дозволив зробити такі висновки: функція, що визначає цей коефіцієнт, зростає зі зростанням довжини судна (збільшення циліндричної вставки ΔL), що зумовлено більш стрімким зростанням коефіцієнту повноти корпусу порівняно зі зростанням коефіцієнту тяги гвинта (рівняння (13)). При розмірній модернізації “*Pride of America*” коефіцієнт t приймає значення від 0,279 до 0,305, відносний коефіцієнт \bar{t} – від 1,0 до 1,1; розрахунки для “*Seabourn Odyssey*” виглядають так: коефіцієнт t приймає значення від 0,220 до 0,279, відносний коефіцієнт \bar{t} – від 1,0 до 1,264.

Характер змін коефіцієнту впливу корпусу η_k , що визначається рівнянням (11), при його подовженні показано на рис. 6. Коефіцієнт η_k при максимальному подовженні змінюється в таких межах: для лайнера “*Pride of America*” від 0,860 до 0,815; для лайнера “*Seabourn Odyssey*” від 0,814 до 0,801. З метою якісної оцінки ступеня зміни коефіцієнтів η_k було застосовано відносний коефіцієнт $\bar{\eta}_k$, значення якого показують, що для “*Pride of America*” він зменшився на 2,7%, а для “*Seabourn Odyssey*” – на 5,5%.

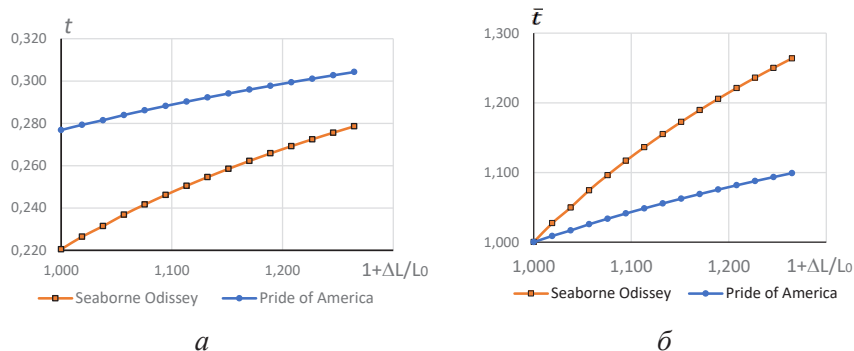


Рис. 5. Вплив подовження суден на коефіцієнт засмоктування: абсолютне значення – а); відносне значення – б)

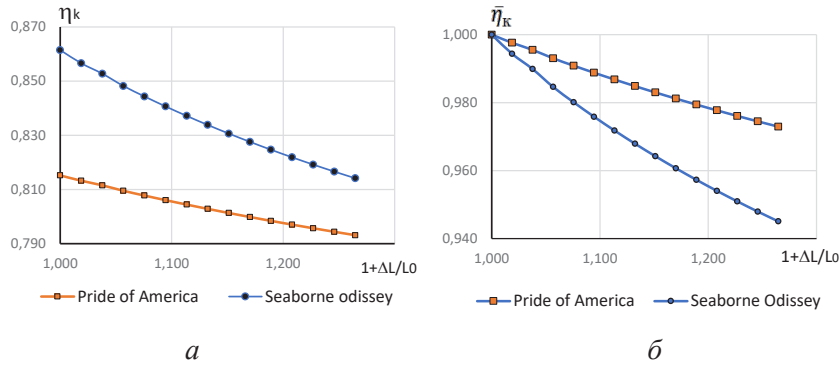


Рис. 6. Результати розрахунку коефіцієнта впливу корпусу залежно від відносної довжини суден: абсолютні значення – а), відносне значення – б)

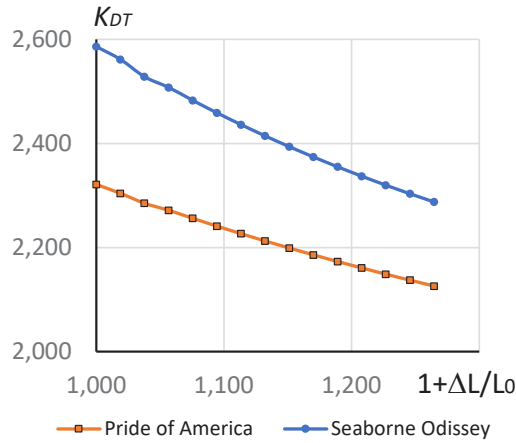


Рис. 7. Значення коефіцієнта навантаження гвинта по упору залежно від довжини судна

Коефіцієнт корисної дії гвинта у вільній воді визначається за дослідженнями, які проводяться у спеціалізованих дослідницьких басейнах, за результатними яких будуються діаграми розрахунку гребних гвинтів. Звичай вони розробляються в координатах $J-K_T$ – відносна хода, коефіцієнт упору. В діаграмах $J-K_T$ як проміжний аргумент застосовується коефіцієнт навантаження гребного гвинта по упору K_{DT} за класичним рівнянням:

$$K_{DT} = V_A D_{ep} \sqrt{\frac{\rho}{T / z_{z\theta}}},$$

де V_A – поступальна швидкість гвинта, м/с, $V_A = 0,515V_s(1 - W_1)$;
 D_{ep} – діаметр гвинта, м;
 T – упор гребного гвинта (сумарний), $T = R_E / (1 - t)$;
 $z_{z\theta}$ – кількість гребних гвинтів.

Графічна залежність, що віддзеркалює вплив подовження суден на зміну значень коефіцієнту K_{DT} , показана на рис. 7. Згідно з цією залежністю за максимального подовження цей коефіцієнт зменшується на 8,4%.

Як зазначалось раніше, коефіцієнт K_{DT} на діаграмі $J-K_T$ виступає аргументом, що визначає ККД гвинта у вільній воді $\eta_{\text{вб}}$. На лайнері “*Pride of America*” встановлені гвинти виробництва Kamewa/Alstom (серії В-4). Гвинти цієї серії були випробувані в Голландському дослідному басейні [19]. Лайнер “*Seabourn Odyssey*” обладнано гвинтами серії Троста виробництва Wartsila.

За діаграмами вказаної серії з урахуванням даних на рис. 7 визначаються коефіцієнти корисної дії гвинтів у вільній воді, на які впливає збільшення довжини судна (рис. 8 А). Відносний ККД $\bar{\eta}_{\text{вб}}$, очевидно, зменшується при зростанні відносної довжини $\bar{L} = 1 + \Delta L / L_0$ на 25%: на 19% для “*Pride of America*” і на 23% для “*Seabourn Odyssey*”.

Проведений попередньо аналіз відкрив можливість дослідити характер впливу збільшення довжини судна на значення пропульсивного коефіцієнту, що визначається за рівнянням (10). Функція, що описується цим рівнянням, є спадною нелінійною функцією у всьому діапазоні значень зміни аргументу $\bar{L} = 1 + \Delta L / L_0$.

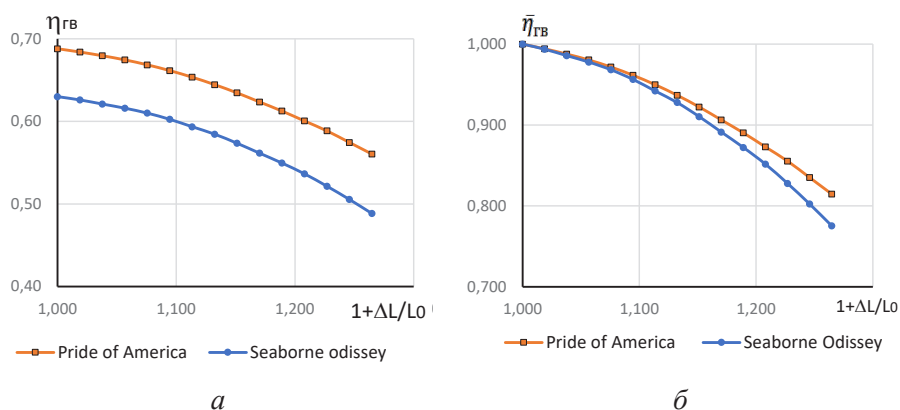


Рис. 8. Результати визначення коефіцієнта корисної дії гребного гвинта залежно від збільшення відносної довжини судна $\bar{L} = 1 + \Delta L / L_0$: абсолютне значення – а); відносне значення – б)

В інтервалі $1,0 \leq \bar{L} = 1 + \Delta L / L_0 \leq 1,1$ відносний пропульсивний коефіцієнт для “*Pride of America*” зменшується на 5%, для “*Seabourn Odyssey*” – на 7%. У наступному інтервалі $1,1 \leq \bar{L} = 1 + \Delta L / L_0 \leq 1,25$ відносний пропульсивний коефіцієнт для “*Pride of America*” зменшується на 22%, для “*Seabourn Odyssey*” – на 27%. З даних результатів випливає, що збільшення довжини на понад 15% від початкової призводить до стрімкого падіння пропульсивного коефіцієнту (рис. 9 А, Б).

Рівняння ходовості (1) в роботах [1; 4] розглядається як обмеження при вирішенні оптимізаційної задачі визначення розміру циліндричної вставки ΔL . У зв'язку з цим рівняння (1) доцільно записати у вигляді, в якому враховується співвідношення пропульсивної потужності P_E і потужності головних двигунів zP_{ME} :

$$\frac{P_E}{zP_{ME}} \frac{1}{\eta_{prop} \eta_{\text{вб}} \eta_{red}} = 1. \quad (13)$$

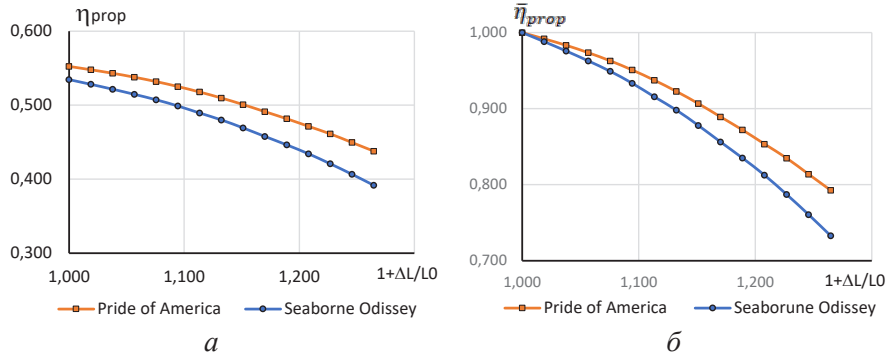


Рис. 9. Результати визначення пропульсивного коефіцієнту залежно від збільшення відносної довжини судна $\bar{L} = 1 + \Delta L / L_0$: абсолютне значення – а), відносне значення – б)

Таке подання рівняння ходовості відкриває простір для аналізу впливу величини збільшення довжини судна на пропульсивну потужність і, навпаки, при заданій потужності zP_{ME} можна забезпечити прийнятний розмір вставки і судна в цілому при забезпеченні проектної експлуатаційної потужності. З графіка (рис. 10) випливає, що для електрохода “Pride of America” точка перетину кривої відносної пропульсивної потужності і відносної потужності головних двигунів має такий вигляд: $\bar{y} = \bar{P}_{ME} = 1$. Ця точка перетину (рис. 10) визначає граничну довжину судна: $\bar{L} = 1 + \Delta L / L_0 = 1,09$, за якої встановлена потужність головних двигунів забезпечує максимальну експлуатаційну швидкість судна $V_s = 22$ вузли. Міркування в аналогічний спосіб щодо електрохода “Seabourne Odyssey” дозволяє за точкою перетину відносної пропульсивної потужності і відносної потужності двигунів віднайти граничне значення відносної довжини судна під час проведення його конверсії (розмірної модернізації): $\bar{L} = 1 + \Delta L / L_0 = 1,15$. Далі буде визначено розмір циліндричної вставки.

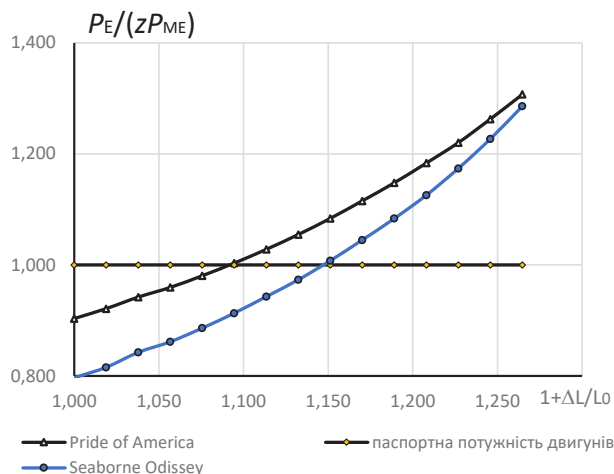


Рис. 10. Залежність пропульсивної потужності (у відносних величинах) суден від довжини судна (у відносних величинах)

Проведені дослідження дозволяють здійснити певні узагальнення. Подовження судна призводить до збільшення пропульсивної потужності. За певних умов рівняння ходовості не стає справедливим, спричинює для проєктувальників такі дії: залишити наявну пропульсивну установку, але зі зменшенням швидкості судна, або провести заміну пропульсивної установки (двигунів, гребних гвинтів, валопроводів, підшипників і муфт). Вочевидь, з урахуванням дуже великої вартості обладнання та монтажних робіт перший варіант є пріоритетним. Таким чином, за першим варіантом виділяється два типи задач (рис. 11):

1) за розрахованою пропульсивною потужністю визначається граничне значення відносної довжини судна: $x_1 = \bar{L}_1 = 1 + \Delta L_1 / L_0$, за якого забезпечується проєктна (паспортна) швидкість судна $V_s = 22$ вузли (рис. 1,11). Якщо величина $x_1 = \bar{L}_1 = 1 + \Delta L_1 / L_0$ буде недостатньою, не в повній мірі узгоджуватиметься з метою модернізації [1], то судновласник може прийняти зважене рішення, керуючись експертними оцінками, щодо зменшення швидкості V_s . При цьому граничні значення відносної довжини судна будуть збільшуватись: криві 2, 3, 4 і відповідні їм значення $x_2 = \bar{L}_{21} = 1 + \Delta L_2 / L_0$, $x_3 = \bar{L}_3 = 1 + \Delta L_3 / L_0$, $x_4 = \bar{L}_4 = 1 + \Delta L_4 / L_0$ при відповідному зменшенні V_s (рис. 11);

2) за пропозицією судновласника встановлюється конкретне значення довжини судна $x = \bar{L} = 1 + \Delta L / L_0$, за яким визначаються відповідні величини – опір, потужність і швидкість судна (рис. 11).

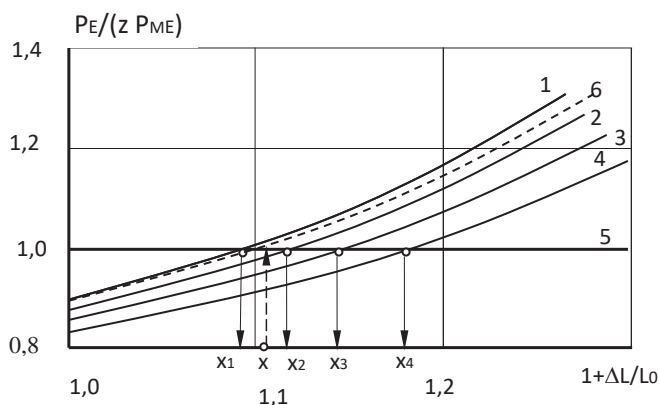


Рис. 11. Визначення граничної довжини судна за критерієм ходовості:
1 – відносна пропульсивна потужність судна за швидкості $V_s = 22$ вузли;
2 – відносна пропульсивна потужність судна за швидкості $V_s = 21$ вузол;
3 – відносна пропульсивна потужність судна за швидкості $V_s = 20$ вузлів;
4 – відносна пропульсивна потужність судна за швидкості $V_s = 19$ вузлів;
5 – відносна потужність головних двигунів;
6 – відносна пропульсивна потужність судна, що забезпечує швидкість V_s
(за заданою довжиною)

Висновки. У даній роботі проведено оцінку пропульсивних характеристик пасажирських суден у разі їх розмірної модернізації, що здійснюється шляхом додавання циліндричної вставки до їх корпусу, яка проводилась на прикладі лайнерів “Pride of America” і “Seabourn Odyssey”:

1) досліджено залежність буксирувального опору від швидкості та відносною довжини корпусу. Показано, що при його подовженні на 27% опір суден зріс на 15% і 18%;

2) визначено якісні і кількісні зміни значень коефіцієнтів гідродинамічної взаємодії – засмоктування і попутного потоку, їх вагу в структурі коефіцієнту впливу корпусу, які збільшились на 2,7% і 5,5% відповідно до максимальних значень подовження;

3) встановлено, що значення коефіцієнтів корисної дії гребних гвинтів у вільній воді вказаних суден (для даних серій і виробників) зменшуються на 22% і 27% відповідно при максимальному подовженні корпусу порівняно з початковими їх значеннями;

4) досліджено пропульсивні коефіцієнти лайнерів у системі «гвинт – двигун – корпус», що розраховуються залежно від величини відносного подовження корпусу. За максимального подовження значення цих коефіцієнтів зменшуються на 21% і 26% (для кожного судна) порівняно з корпусами початкової довжини.

5) запропоновано нову форму рівняння ходовості, яке представляється у відносних одиницях, що відкриває можливість для безпосереднього визначення довжини корпусу і циліндричної вставки за відношенням пропульсивної потужності та потужності головних двигунів;

6) рекомендовано вирішувати на базі кривих відносною пропульсивної потужності два типи задач (прямих і зворотніх): перший (прямий) пропонує покроково визначати довжину вставки відповідно до спроможності забезпечити необхідну швидкість судна, другий (зворотній) передбачає для конкретного значення довжини вставки (довжини судна) можливість визначення відповідного їй значення буксирувального опору, через яке буде знайдено можливу швидкість за встановленою потужністю головних двигунів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Шумило О. (2022). Визначення оптимальних розмірів подовження пасажирських суден у процесі їх модернізації. *Розвиток транспорту*, (1(12)), 85–104. <https://doi.org/10.33082/td.2022.1-12.08>.
2. Cruise Market Watch. Electronic resource. Access mode: <https://cruisemarketwatch.com/passenger-origins>.
3. Cruise Lines International Association (CLIA). Electronic resource. Access mode: <https://www.cruising.org.au>.
4. Шумило О. (2023). Дослідження впливу розмірної модернізації на геометричні характеристики пасажирського судна. *Розвиток транспорту*, (2(17)), 75–89. <https://doi.org/10.33082/td.2023.2-17.07>.
5. Шумило О. (2023). Оптимізація розмірної модернізації пасажирських суден з урахуванням енергоефективності. *Розвиток транспорту*, (4(15)), 58–77. Retrieved із <https://journals.onmu.in.ua/index.php/journal/article/view/191>.
6. Schneekluth, H., Bertram, V., Ship design for efficiency and economy, Butterworth Heinemann, Oxford 1998.
7. Holtrop, J., Mennen, G.G.J., An approximated power prediction method, *International Shipbuilding Progress*, Vol. 29, 1984.

8. D. Li, P. A. Wilson, Y. Guan, and X. Zhao, “An Effective Approximation Modeling Method for Ship Resistance in Multidisciplinary Ship Design Optimization,” in Volume 2: CFD and VIV, San Francisco, California, USA, Jun. 2014, p. V002T08A023. doi: 10.1115/OMAE2014-23407.
9. R. de Winter, B. van Stein, M. Dijkman, and T. Bäck, “Designing Ships Using Constrained Multi-objective Efficient Global Optimization,” Springer International Publishing, Cham, 2019. doi: 10.1007/978-3-030-13709-0_16
10. R. de Winter, J. Furustam, T. Bäck, and T. Muller, “Optimizing Ships Using the Holistic Accelerated Concept Design Methodology,” in Practical Design of Ships and Other Floating Structures, Singapore, 2021, vol. 65, pp. 38–50. doi: 10.1007/978-981-15-4680-8_3.
11. Nanda Yustina, Ari Saptawijaya, Surrogate Model-based Multi-Objective Optimization in Early Stages of Ship Design, *Jurnal RESTI (Rekayasa Sistem dan Teknologi Informasi)* 6(5):782–789, October 2022.
12. Некрасов В.О., Нгуен Гуй Хоанг. Визначення оптимальних характеристик швидкохідного пасажирського судна. *Вісник Національного університету кораблебудування*. 2012. Вип.2. С. 23–29.
13. Bakica A, Vladimir N, Gatin I, Jasak H. 2020. CFD simulation of loadings on circular duct in calm water and waves. *Ships Offsh Struct.* 1–13.
14. Haase M, Davidson G, Binns J, Thomas G, Bose N. 2017. Full-scale resistance prediction in finite waters: A study using computational fluid dynamics simulations, model test experiments and sea trial measurements. *Proc Inst Mech Eng.*
15. Huang L, Li Z, Ryan C, Ringsberg JW, Pena B, Li M, Ding L, Thomas G. 2021a. Ship resistance when operating in floating ice floes: Derivation, validation, and application of an empirical equation. *Mar Struct.* 79:103057.
16. Huang L, Tuhkuri J, Igric B, Li M, Stagonas D, Toffoli A, Cardiff P, Thomas G. 2020. Ship resistance when operating in floating ice floes: A combined CFD&DEM approach. *Mar Struct.* 74:102817.
17. Jasak H, Vukčević V, Gatin I, Lalović I. 2019. CFD validation and grid sensitivity studies of full scale ship self propulsion. *Int J Nav Archit Ocean Eng.* 11:33–43.
18. Сліжевський М.Б. Король Ю.М., Соколик М.Г., Тимошенко В.Ф. Розрахунок ходовості надводних водотоннажних суден : навчальний посібник. Миколаїв, НУК, 2004. 192 с.
19. Шостак В.П., Гершанік В.І., Кот В.П., Бондаренко М.С. Проектування пропульсивної установки суден з прямою передачею потужності на гвинт : навчальний посібник. Миколаїв : УМДГУ, 2003. 500 с.
20. Шумило О. (2023). Дослідження буксирувального опору круїзних суден при їх розмірній модернізації. *Розвиток транспорту*, (4(19), 140–162. <https://doi.org/10.33082/td.2023.4-19.11>.

REFERENCES

1. Shumylo, O. (2022). Determining the optimal length of passenger ships in the process of their modernization [Vyznachennya optymalnykh rozmiriv podovzhennya pasazhyrskykh suden u protsesi yikh modernizatsiyi]. *Transport development*, (1(12), 85–104. doi.org/10.33082/td.2022.1-12.08
2. Cruise Market Watch. Electronic resource. Access mode: <https://cruisemarketwatch.com/passenger-origins>.
3. Cruise Lines International Association (CLIA). Electronic resource. Access mode: <https://www.cruising.org.au>.
4. Shumylo O. (2023). Study of the impact of dimensional modernization on the geometric characteristics of a passenger ship [Doslidzhennya vplyvu rozmirnoyi modernizatsiyi na heometrychni kharakterystyky pasazhyrskoho sudna]. *Transport development*, (2(17), 75–89. doi.org/10.33082/td.2023.2-17.07
5. Shumylo O. (2023). Optimization of dimensional modernization of passenger ships taking into account energy efficiency [Optyimizatsiya rozmirnoyi modernizatsiyi pasazhyrskykh suden z urakhuvannyam enerhoefektyvnosti]. *Transport development*, (4(15), 58–77. Retrieved iz <https://journals.onmu.in.ua/index.php/journal/article/view/191>
6. Schneekluth, H., Bertram, V., Ship design for efficiency and economy, Butterworth Heinemann, Oxford 1998.
7. Holtrop, J., Mennen, G. G. J., (1984.) An approximated power prediction method, *International Shipbuilding Progress*, Vol. 29/
8. D. Li, P. A. Wilson, Y. Guan, and X. Zhao, “An Effective Approximation Modeling Method for Ship Resistance in Multidisciplinary Ship Design Optimization,” in Volume 2: CFD and VIV, San Francisco, California, USA, Jun. 2014, p. V002T08A023. doi: 10.1115/OMAE2014-23407.
9. R. de Winter, B. van Stein, M. Dijkman, and T. Bäck, “Designing Ships Using Constrained Multi-objective Efficient Global Optimization,” Springer International Publishing, Cham, 2019. doi: 10.1007/978-3-030-13709-0_16
10. R. de Winter, J. Furustam, T. Bäck, and T. Muller, “Optimizing Ships Using the Holistic Accelerated Concept Design Methodology,” in *Practical Design of Ships and Other Floating Structures*, Singapore, 2021, vol. 65, pp. 38–50. doi: 10.1007/978-981-15-4680-8_3.
11. Nanda Yustina, Ari Saptawijaya, Surrogate Model-based Multi-Objective Optimization in Early Stages of Ship Design, *Jurnal RESTI (Rekayasa Sistem dan Teknologi Informasi)* 6(5):782-789, October 2022.
12. Nekrasov V.O., Nguyen Gui Hoang (2012). Determination of optimal characteristics of a high-speed passenger ship [Vyznachennya optymalnykh kharakterystyk shvydkokhidnoho pasazhyrskoho sudna]. *Bulletin of the National University of Shipbuilding*. Issue. 2.
13. Bakica A, Vladimir N, Gatin I, Jasak H. 2020. CFD simulation of loadings on circular duct in calm water and waves. *Ships Offsh Struct.* 1–13.
14. Haase M, Davidson G, Binns J, Thomas G, Bose N. 2017. Full-scale

- resistance prediction in finite waters: A study using computational fluid dynamics simulations, model test experiments and sea trial measurements. *Proc Inst Mech Eng*.
15. Huang L, Li Z, Ryan C, Ringsberg JW, Pena B, Li M, Ding L, Thomas G. 2021a. Ship resistance when operating in floating ice floes: Derivation, validation, and application of an empirical equation. *Mar Struct*. 79:103057
 16. Huang L, Tuhkuri J, I Grec B, Li M, Stagonas D, Toffoli A, Cardiff P, Thomas G. 2020. Ship resistance when operating in floating ice floes: A combined CFD&DEM approach. *Mar Struct*. 74:102817.
 17. Jasak H, Vukčević V, Gatin I, Lalović I. 2019. CFD validation and grid sensitivity studies of full scale ship self propulsion. *Int J Nav Archit Ocean Eng*. 11:33–43.
 18. Slizevskyi M.B., Korol Y.M., Sokolyk M.G., Tymoshenko V.F. (2004) Calculation of maneuverability of surface water tonnage vessels [Rozrakhunok khodovosti nadvodnykh vodotonazhnykh suden]: Training manual. – Mykolaiv, NUK.
 19. Shostak V.P., Gershanik V.I., Kot V.P., Bondarenko M.S. (2003) Designing the propulsion system of ships with direct transmission of power to the propeller [Proyektuvannya propul'syvnoyi ustanovky suden z pryamoyu peredacheyu potuzhnosti na hvynt]. Education manual. Mykolaiv: UMDTU.
 20. Shumylo, O. (2023). STUDY OF TOWING RESISTANCE OF CRUISE SHIPS DURING THEIR DIMENSIONAL MODERNIZATION. *Transport Development*, (4(19), 140–162. <https://doi.org/10.33082/td.2023.4-19.11>.

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

УДК 656.078.13:338.47

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2024.1-20.08>

ОГЛЯД ФРАХТОВОГО РИНКУ УКРАЇНИ В УМОВАХ ВІЙНИ

Н.В. Судник¹, А.І. Софронов²

¹к.е.н., доцент кафедри «Експлуатація флоту і технологія морських перевезень»,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0003-4800-9883

²аспірант кафедри «Експлуатація флоту і технологія морських перевезень»,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0009-0000-0455-4578

Анотація

Вступ. Морський транспорт історично є основним видом транспорту під час перевезення масових вантажів. У статті розглядаються зміни у ланцюгах постачання експортних вантажів з України, що відбулися через морську блокаду портів, зокрема у контексті фрахтового ринку суден при перевезенні зернових вантажів. **Мета** – проаналізувати зміни у фрахтовому ринку, що відбулися за період 2022–2023 рр., використовуючи метод аналізу статистичних даних щодо рівня фрахтових ставок та кількісних показників експорту зернових з України. **Результати.** Після суцільного переривання ланцюгів постачань вантажів морським транспортом, що встановлювалися десятиріччями, у перші місяці 2022 року як експортери, так і судновласники досить швидко адаптувалися до нових реалій морської блокади. Єдиними українськими портами, що експлуатувалися у першому півріччі 2023 року, були порти Ізмаїл та Рені. Слабкими були як потужності обробки суден на причалах, так і пропускна здатність каналу Суліна, а згодом і Гирла Бистре. Значне збільшення попиту на тоннаж разом з надпростоями в очікуванні постановки під причал призвело до стрімкого та відчутного підвищення рівня фрахтових ставок з портів Дунаю. На даний момент спочатку через роботу «зернового коридору», а зараз тимчасового морського коридору рівень фрахтових ставок з портів Дунаю повернувся до рівня 2021 року, а фрахтовий ринок регіону Великої Одеси повернувся до загальнорегіонального рівня, хоча і є значно вищим за рівень фрахтових ставок сусідніх портів через додаткові ризики судновласників, які переносяться на фрахтувальників. **Висновки.** Незважаючи на позитивну тенденцію щодо відновлення кількісних показників експорту зернових з України як морським транспортом так і в цілому, економічна ефективність експорту зернових сильно знизилася. Покращення ситуації можливе через підвищення безпекового рівня, який сприймається судновласниками, продовження розробки механізмів державного страхування суден та створення флоту морських суден, що оперується українськими державними судноплавними компаніями як один з варіантів зниження витрат експортерів.

Ключові слова: огляд фрахтового ринку, порівняльний аналіз, експорт зернових, ланцюги постачань, експлуатація флоту.

REVIEW OF UKRAINE'S FREIGHT MARKET DURING THE WAR

N.V. Sudnyk¹, A.I. Sofronov²

¹PhD, Associate Professor at the Department of Fleet operation and shipping technology,
Odesa national maritime university, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0003-4800-9883

²PhD student at the Department of Fleet operation and shipping technology,
Odesa national maritime university, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0009-0000-0455-4578

Summary

Introduction. Historically, maritime transport is the main mode of transport for the transportation of bulk cargo. The article examines the changes in the supply chains of export goods from Ukraine, which occurred due to the sea blockade of ports, in particular in the context of the freight market of ships transporting grain cargoes. **Purpose:** to analyze the changes in the freight market that occurred during the period 2022-2023, using the method of analyzing statistical data regarding the level of freight rates and quantitative indicators of grain exports from Ukraine. **Results.** After the complete disruption of the decades-long sea transport supply chains, in the first months of 2022, both exporters and shipowners quickly adapted to the new realities of the maritime blockade. The only Ukrainian ports operating in the first half of 2023 were the ports of Izmail and Reni, and the bottlenecks were both the vessel handling capacity at the berths and the capacity of the Sulina canal, and later the Gırla Bystre canal. A significant increase in demand for tonnage, together with excessive downtime in anticipation of berthing, led to a sharp and significant increase in the level of freight rates from the Danube ports. At the moment, first due to the work of the "Grain Corridor", and now – the temporary sea corridor - the level of freight rates from the Danube ports has returned to the level of 2021, and the freight market of the Great Odesa region has returned to the overall regional market, although it is significantly higher than the level freight rates of neighboring ports, due to additional risks of shipowners, which are transferred to charterers. **Conclusion.** Despite the positive trend regarding the recovery of the quantitative indicators of grain exports from Ukraine, both by sea transport and in general, the economic efficiency of grain exports has greatly decreased. Improvement of the situation is possible through increasing the safety level perceived by ship owners, continuing the development of state ship insurance mechanisms, and creating a fleet of sea vessels operated by Ukrainian state shipping companies – as one of the options for reducing exporters' costs.

Key words: freight market overview, comparative analysis, grain export, supply chains, fleet operation.

Постановка проблеми. Морські блокади під час війни як інструмент економічного виснаження противника у сучасному розумінні застосовувалися ще з часів Першої світової війни і мали на меті переривання ланцюгів постачання ресурсів як на імпорт, так і на експорт. Прикладами таких морських блокад можна вважати блокаду Німеччини під час Першої світової війни, що була одним з факторів виснаження військової промисловості, та блокаду Ірану під час Ірано-Іракської війни, що знизила кількість експортованої нафти втричі [1]. Остання також залишається

в історії морського права завдяки прецеденту *The Kanchenjunga* [1990] 1 *Lloyd's Rep* 391 щодо відмови однієї зі сторін від виконання договору перевезення, а саме суднозаходу в небезпечний порт.

У контексті України морська блокада має на меті зменшення прибутків держави від експорту зернових вантажів, руди та металопрокату, що становили більшість експортованих вантажів, як через зменшення прибутку через високі фрахтові ставки і більш складні альтернативні шляхи перевезення, так і через зменшення фізичного обсягу експорту через руйнацію портової інфраструктури.

За відсутності державного морського флоту українські експортери повністю залежать від іноземних судновласників, які компенсують ризики простою та пошкодження суден через бойові дії підвищеними фрахтовими ставками. У цій ситуації важливим є аналіз ситуації на фрахтовому ринку регіону задля вибору оптимального маршруту постачання вантажів на світові ринки.

Аналіз останніх публікацій. Проблема недоотриманих прибутків українських експортерів через бойові дії та морську блокаду оглядається у статті Н.Т. Гринів та А.А. Равліковської [2], О.А. Шевчук та Н.В. Гайванович [3], а серед іноземних авторів – Gabriel Fernandes, Pedro Teixeira, Tiago A. Santos (2023) щодо підвищення вартості експортування зернових вантажів. Окрім фахових звітів іноземних фрахтових брокерів та статей у виданнях, дуже мало уваги приділяється саме огляду фрахтового ринку останніх років з наведенням ставок і порівнянням як з довоєнним ринком, так і з ринком найближчих до України морських портів.

Метою статті є огляд фрахтових ставок в регіоні, витрат експортерів на морські перевезення з портів України та альтернативних шляхів і впливу морської блокади на кінцеву ціну зернових вантажів з України.

Виклад основного матеріалу. З лютого 2022 року ланцюги постачання зернових вантажів з України на світові ринки, що використовувались з 1991 року, а саме морські порти Великої Одеси (Південний, Одеса, Чорноморськ) та Миколаєва, були перервані через морську блокаду з боку РФ. Протягом пів року до відкриття зернового коридору порти Великої Одеси були закриті, тоді як найбільший за обсягами перевалювання зернових вантажів у 2021 році порт Миколаїв, включно з рейдовим довантаженням на банці Трутаєва, є закритим досі. За цей час українські аграрії на неокупованих територіях вдалися до альтернативних шляхів постачань, які або не використовувались до цього взагалі, або використовувались у незначних обсягах. Ідеться про порти Дунаю в Україні (Ізмаїл та Рені), а також порти Констанца (Румунія) і Гданськ (Польща).

Відповідно до [3] Україна втрачає близько 170 млн дол. в день через блокаду судноплавства у Чорному та Азовському морях через недоотримання податку на прибуток експортерів та експортного мита. Згідно з [5] порівняно з 2021 роком обсяг обробки експортних вантажів в українських дунайських портах виріс у 2022 році у 40 разів – з близько 175 тис. т до майже 7 млн т. За час роботи «зернового коридору», з серпня 2022 року до липня 2023 року згідно з [6] було експортовано з портів Великої Одеси 32,8 млн т продукції агропромислового комплексу. Через порт Констанца згідно з [7] було відвантажено 8,6 млн т українського зерна за 2022 рік, а за перші пів року 2023 р. 8,1 млн т, що при збереженні тенденції призведе до подвоєння обсягів обробки понад удвічі.

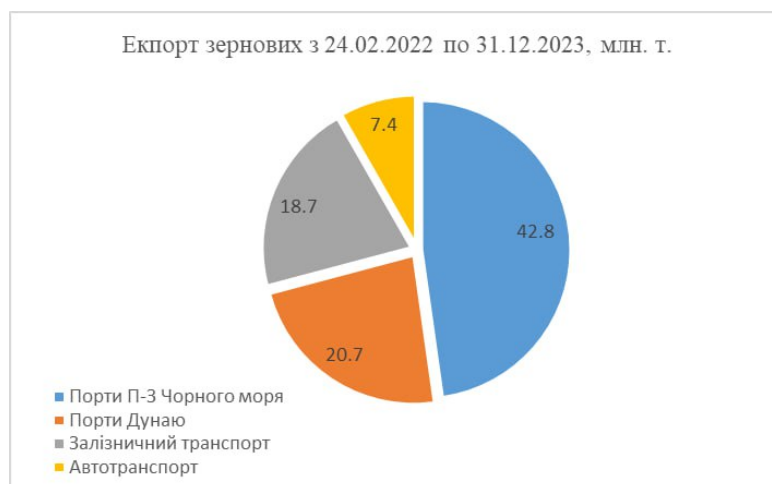


Рис. 1. Експорт зернових з України, 2022–2023 рр. [8]

Таблиця 1

**Порівняння врожаю та експорту зернових за 2021–2023 роки
в абсолютних показниках, млн т [8] та %**

Показник	2021 рік	2022 рік	2023 рік
Врожай зернових, млн т	83,2	53,8	77,4
Експортовано, млн т:			
– загалом;	50,8	38,9	61,7
– з них через порти України	50,8	26	47,2
Експорт порівняно з врожаєм, %:			
– загалом;	61	72	80
– з них через порти України	100	67	76

Таким чином, якщо розглянути статистику, що наведена у таблиці 1, можна дійти висновку, що експорт зернових у 2023 р. у абсолютних показниках навіть перевищив рівень 2021 року. Але у фінансових показниках чистий прибуток експортерів був набагато меншим через підвищення витрат на перевезення вантажу до порту Констанца та високих фрахтових ставок при фрахтуванні суден, що заходять в порти України.

Так, згідно з [4] та [9] витрати на транспортування зерна на світові ринки підвищились від 79% до 131% порівняно з 2021 роком, а закупівельні ціни на пшеницю знизились з 273 дол./т до 188 дол./т задля забезпечення конкурентоспроможності українських зернових на світовому ринку. За видом транспорту на маршруті з Кропивницького до Александрії витрати на перевезення автотранспортом підвищились на 24% (з 7 дол./т до 8,8 дол./т), залізницею – на 82% (з 12 дол./т до 21,6 дол./т), морським фрахтом – на 108% (з 25,9 дол./т до 54 дол./т).

У першому півріччі 2022 року фрахтові ставки з портів Дунаю були надзвичайно високими через великі черги на прохід каналом Суліна (оскільки гирло Бистре було перекрите через військові ризики), низьку пропускну здатність портової інфраструктури та низьку пропозицію тоннажу за високого попиту на нього.

За статистикою, що наведена у [10], у червні – серпні 2022 року середній час очікування судна на рейді Суліни був 12–15 діб. Цей показник знизився до 3–5

діб після деокупації о. Зміїний і відкриття гирла Бистре. Пропускна здатність обох каналів підвищувалася поступово за рахунок як днопоглиблення, так і підвищення кількості лоцманів і кооперації між відповідними службами Румунії та України. На практиці витрати за надлишковий простій суден на рейді переклалися на фрахтувальників, частіше за все українських експортерів за рахунок так званої Сулінської статті (Sulina clause) у чартер партіях. Фрахтувальник має 7 днів з моменту прибуття судна на зовнішній рейд, після чого до моменту постановки судна під завантаження за кожен день або частину дня фрахтувальник оплачує демередж у розмірі, встановленому судовласником.

У серпні 2022 року перші судна за «зерновою угодою» почали заходити в порти Великої Одеси, що відкрило для експортерів можливість фрахтувати судна типорозміру Панамакс до 75 тис. т чистого дедвейту (у порівнянні з суднами типорозміру Костер – Хендісайз до 20 тис. т чистого дедвейту, які спроможні зайти в порти Дунаю навіть після днопоглиблення). Через це як фрахтові ставки, так і попит на тоннаж з портів Дунаю знизились майже удвічі.

З початку 2023 року влада рф де-факто саботувала роботу «зернової угоди», у зв'язку з чим згідно з [11] середній час очікування суден на проходження інспекцій у січні 2023 року становив 21 добу, а у деяких випадках час простою судна як на вхід в Чорне море, так і на вихід з нього сягав до 3 місяців у кожную сторону (з практики автора та колег – Н. С., А. С.). Як і у випадку з Сулінською статтею надлишкові витрати за очікування судовласники переносили на фрахтувальника, а експортери були вимушені робити знижки на кінцеву ціну зерна на умовах постачання CIF.

Так, на основі [11] наводяться дані щодо розміру фрахтових ставок з портів Чорноморськ та Констанца до портів Іспанії у Середземному морі для суден типорозміру Хендісайз у 2021–2023 роках (рисунок 2), а також щодо долі фрахту у ціні зернових при фрахтуванні на рейс з порту Ізмаїл до порту Александрія у Єгипті (рисунок 4).

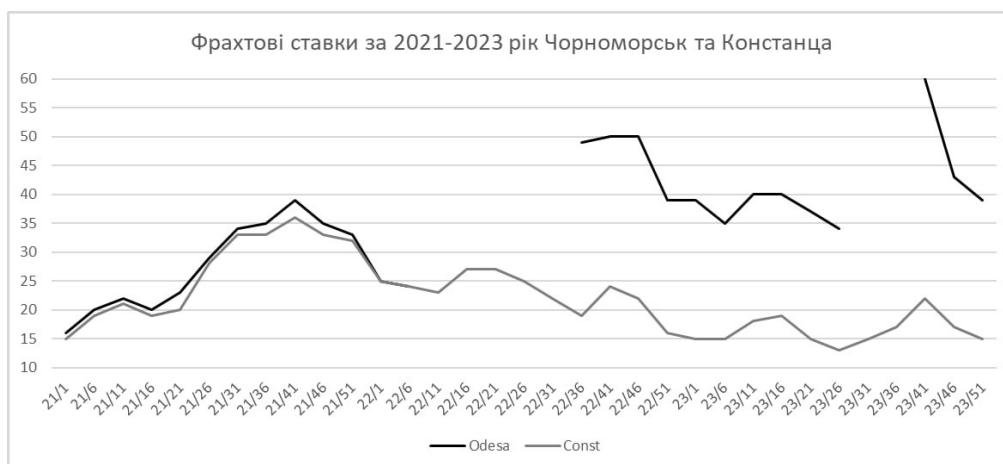


Рис. 2. Порівняння рівня фрахтової ставки з порту Одеса (Odesa) та порту Констанца (Const) для суден дедвейтом 25 тис. т до портів Іспанії у Середземному морі, дол./т

Wheat / corn, 5-6,000t, Reni / Izmail - Alexandria (1250x/1250x), \$/t

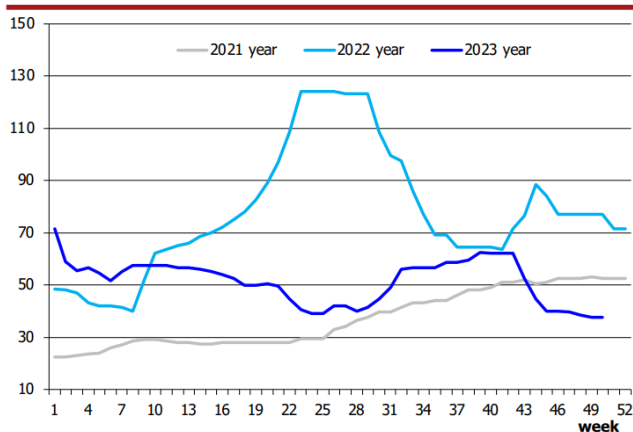


Рис. 3. Рівень фрахтових ставок з порту Ізмаїл

Ukrainian wheat: weight of freight in CFR Adriatic price

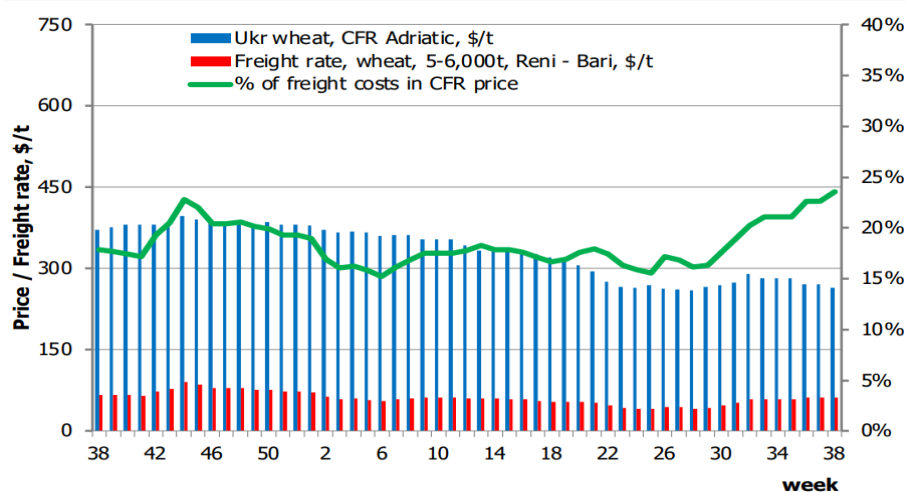


Рис. 4. Доля фрахту у ціні української пшениці, жовтень 2022 – жовтень 2023 рр.

Відповідно до вищевказаних даних найвищий рівень фрахтових ставок з порту Ізмаїл був влітку 2022 року – до 130 дол./т, або на 333% більше, ніж за аналогічний період 2021 року. На кінець 2023 рівень ставок з порту Ізмаїл стабілізувався на показнику 37 дол./т, або на 30% менше, ніж в аналогічний період 2021 року. При цьому рівень фрахтових ставок з порту Одеса у 2021 році був майже аналогічним з рівнем фрахтових ставок з порту Констанца, а під час роботи «зернового

коридору» коливання на ринку фрахту були суміжні при загальному рівні ставок на 20–25 дол./т вище, ніж з порту Констанца.

Після припинення роботи «зернової угоди» порти Великої Одеси знову стали недоступними для суднозаходів, але у жовтні 2023 року після затвердження процедури страхування судновласників від військових ризиків від державних інстанцій у розмірі до 50 млн дол. перші судна змогли безперешкодно завантажитись та вийти з портів Великої Одеси. Якщо перше судно за такою процедурою було зафрахтовано за 74 дол./т, то вже за 3 тижні рівень фрахтових ставок склав 53 дол./т, що навіть нижче, ніж за аналогічний період 2022 року. У грудні 2023 року рівень фрахтових ставок також стабілізувався відносно сусіднього порту Констанца і становив 40 дол./т, що на 25 дол./т (у відсотковому значенні на 165%) більше, ніж з порту Констанца.

Загалом можна зробити висновок, що фрахтові ринки Одеси та Констанци, що були аналогічними у довоєнні роки, у період 2022–2023 рр. зберігали свою схожість, на них впливали такі самі зовнішні фактори (врожайність в регіоні, зміни балансу попиту та пропозиції вантажу та тоннажу), за тим винятком, що за рахунок підвищеного ризику і труднощів при страхуванні суден та вантажу (рис. 2) рівень фрахтових ставок з порту Одеса був стабільно вищим за рівень порту Констанца на 25 дол./т.

На рис. 4 показано, що у відсотковому відношенні доля витрат на перевезення морським транспортом з порту Ізмаїл складає в середньому 15–25% від кінцевої ціни зернових на Середземноморському ринку. Підвищення долі транспортних витрат за останні 2 місяці пояснюється пошкодженням інфраструктури портів Дунаю, підвищенням ризиків для судновласників та підвищенням попиту на тоннаж через припинення «зернової угоди». Кожен з вищезазначених факторів окремо і усі вони в комплексі вплинули на підвищення рівня фрахтових ставок.

На жаль, будь-які прогнози щодо рівня фрахтових ставок в регіоні неможливі через ризики руйнації припортової інфраструктури та суден, що тривають, тому автор утримується від прогнозування на найближче майбутнє.

Висновки. З матеріалу статті можна відокремити такі основні тези.

1. Кількісні показники експорту зернових з України у 2023 році покращилися порівняно з 2022 роком через розширення пропускної спроможності альтернативних шляхів постачань та відносно стабілізацію військових ризиків. Частка морських портів у долі експорту зернових значно підвищилася, але наземні шляхи експорту зернових все ще використовуються.

2. Витрати на транспортування зерна на світові ринки підвищились від 79% до 131% порівняно з 2021 роком, через що суттєво знизилися прибутки як виробників зернових, так і експортерів.

3. Рівень фрахтових ставок під час роботи «зернової угоди» був вищим, ніж з порту Констанца, але він відповідав ситуації на ринку в цілому. Водночас суттєві затримки в проходженні суднами інспекцій нівелювали вигоду від перевезення більших судових партій експортерами. Іноземні судновласники отримували як підвищений фрахт, так і демередж за затримку суден.

4. Відкриття портів Великої Одеси після припинення «зернової угоди» і державне страхування судновласників від військових ризиків дозволяє експортерам

поставляти зерно на світові ринки вчасно та без простою суден на інспекціях, а рівень фрахтових ставок знизився до рівня аналогічного періоду 2022 року.

ЛІТЕРАТУРА

1. Segal D. The Iran-Iraq War: A Military Analysis. *Foreign Affairs*. 1988. Vol. 66 (5). P. 946–963. doi:10.2307/20043572.
2. Гринів Н.Т., Равліковська А.А. Перебудова логістики в умовах воєнного стану в Україні. *Академічні візії*. 2022. Вип. 13, С. 48–58. doi:10.5281/zenodo.7411975.
3. Шевчук О.А., Гайванович Н.В. Сучасний стан, проблеми та перспективи розвитку морських вантажних перевезень в Україні та світі. *Економічний вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. 2023. Вип. 25. С. 59–64. doi:10.20535/2307-5651.25.2023.278603.
4. Gabriel Fernandes, Pedro Teixeira, Tiago A. Santos. The impact of the Ukraine conflict in internal and external grain transport costs. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*. 2023. Vol. 19. P. 25–34. doi:10.1016/j.trip.2023.100803.
5. Через українські порти за рік пройшло 59 мільйонів тонн вантажів: підсумки року від АМПУ. URL: <https://suspilne.media/370576-cerez-ukrainski-porti-za-rik-projslo-59-miljoniv-tonn-vantaziv-pidsumki-roku-vid-ampu/>.
6. Обсяги експорту агропродукції зерновим коридором : інтерактивна таблиця. URL:<https://uga.ua/statistika-zernovogo-koridoru/>.
7. Порт Констанца відвантажив майже 12 млн т українського зерна від початку повномасштабної війни. URL: <https://www.railinsider.com.ua/port-konstancza-vidvantazhyv-majzhe-12-mln-t-ukrayinskogo-zerna-pislya-pochatku-povnomasshtabnoyi-vijny/>.
8. Стан зовнішньої торгівлі продуктами АПК : інтерактивна таблиця. URL: https://public.tableau.com/views/v1_Export_of_Agriproducts_v2/Dashboard1?:language=en-US&:display_count=n&:origin=viz_share_link:showVizHome=no&:embed=true.
9. Delmy Salin. Ukraine Grain Transportation. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Marketing Service. 2023. doi:10.9752/TS260.06-2023.
10. Фрахтові ставки на Дунаї поступово знижуються. URL: <https://maritime-logistics.com.ua/anton-shapran-frakhtovi-stavki-na-dunai/>.
11. Update on the Black Sea Grain Initiative (18 January 2023). URL: <https://reliefweb.int/report/world/note-correspondents-update-black-sea-grain-initiative-18-january-2023>.
12. ISM coasters and mini bulkers report, Week 38–42. URL: <https://www.hellenicshippingnews.com/ism-coasters-and-mini-bulkers-week-42/>.

REFERENCES

1. Segal, D. (1988). The Iran-Iraq War: A Military Analysis // Foreign Affairs, Vol. No. 66(5), P. 946–963. doi:10.2307/20043572.

2. Hryniv N. T., Ravlikovska A. A. (2022). Rebuilding of logistics in the conditions of martial law in Ukraine [Perebudova lohistyky v umovakh voiennoho stanu v Ukraini]. *Academic visions*, Vol. 13, pp. 48-58. doi:10.5281/zenodo.7411975 [in Ukrainian].
3. Shevchuk O.A., Gaivanovych N.V. (2023). Current state, problems and prospects of the development of maritime freight transportation in Ukraine and the world [Suchasnyi stan, problemy ta perspektyvy rozvytku morskyykh vantazhnykh perevezen v Ukraini ta sviti]. *Economic Bulletin of NTUU “Kyiv Polytechnic Institute”*, Vol. 25, pp. 59–64. doi:10.20535/2307-5651.25.2023.278603 [in Ukrainian].
4. Gabriel Fernandes, Pedro Teixeira, Tiago A. Santos (2023). The impact of the Ukraine conflict in internal and external grain transport costs. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, Vol. 19, P. 25–34. doi:10.1016/j.trip.2023.100803.
5. 59 million tons of cargo passed through Ukrainian ports during the year: results of the year from AMPU. URL:<https://suspilne.media/370576-cerez-ukrainski-porti-za-rik-projslo-59-miljoniv-tonn-vantaziv-pidsumki-roku-vid-ampu/>.
6. Volumes of export of agricultural products through the grain corridor, interactive table. URL: <https://uga.ua/statistika-zernovogo-koridoru/>.
7. The port of Cinstanta shipped almost 12 million tons of Ukrainian grain since the beginning of the full-scale war - URL: <https://www.railinsider.com.ua/port-konstancza-vidvantazhyv-majzhe-12-mln-t-ukrayinskogo-zerna-pislya-pochatku-povnomasshtabnoyi-vijny/>
8. State of foreign trade in agricultural products. Interactive table - URL:https://public.tableau.com/views/v1_Export_of_Agriproducts_v2/Dashboard1?:language=en-US&:display_count=n&:origin=viz_share_link;showVizHome=no&:embed=true.
9. Delmy Salin (2023). Ukraine Grain Transportation. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Marketing Service. doi:10.9752/TS260.06-2023.
10. Freight rates on the Danube are gradually decreasing. URL: <https://maritime-logistics.com.ua/anton-shapran-frakhtovi-stavki-na-dunai/>.
11. Update on the Black Sea Grain Initiative (18 January 2023) – URL: <https://reliefweb.int/report/world/note-correspondents-update-black-sea-grain-initiative-18-january-2023>
12. ISM coasters and mini bulkers report, Week 38–42. URL: <https://www.hellenicshippingnews.com/ism-coasters-and-mini-bulkers-week-42/>.

ОСОБЛИВОСТІ ВИБОРУ ІЗОТЕРМІЧНИХ РЕЗЕРВУАРІВ ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ СКРАПЛЕНИХ ПРИРОДНИХ ГАЗІВ

О.Т. Чернова

к.т.н., доцент кафедри «Транспортування та зберігання енергоносіїв»,
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
Івано-Франківськ, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-6424-7569

Анотація

Вступ. У наш час природний скраплений газ користується величезною популярністю у всіх сферах життя – опалення, приготування їжі, транспорт та багатьох інших. І причин для цього немало – екологічна чистота, зручність використання, низька вартість тощо. Родовища природного газу є не у всіх куточках Землі, тому виникла проблема його транспорту. Як відомо, газ при нормальних умовах перебуває у газоподібній фазі і займає значні об'єми. Скраплений природний газ, або скорочено СПГ, як прийнято називати його в енергетичній галузі (англ. Liquefied Natural Gas, скор. LNG) являє собою звичайний природний газ, охолоджений до температури -162°C (так звана температура скраплення) для зберігання і транспортування в рідкому вигляді. **Мета.** Дана стаття розширює аналіз особливостей вибору резервуарів для зберігання скраплених газів. Оскільки зберігається скраплений газ в ізотермічних резервуарах за температури кипіння, яка підтримується внаслідок випаровування СПГ, вибір ємностей для зберігання СПГ відіграє важливе значення у ланцюгу «транспортування – доставка газу». Отже, важливо безпечно та ефективно вибрати метод зберігання СПГ. **Результати.** У праці наведено дослідження науковців з проблем проектування й експлуатації сховищ для СПГ, статистичні параметри досліджень, динаміку розвитку газового ринку та структуру змін світових потужностей для експорту LNG. Охарактеризовано питання вибору способу зберігання значних обсягів скраплених природних газів та практики будівництва комплексів, класифікацію ємностей. Аналіз резервуарів, які на даний час використовуються у реалізованих міжнародних проєктах, показав, що серед великогабаритних резервуарів найбільш поширені конструкції повної герметизації, проте ізотермічні резервуари одинарної герметизації в низці випадків є не менш конкурентоспроможними, що забезпечує необхідний рівень безпеки зберігання за меншої вартості. **Висновки.** У даній статті показано, що вибір типу резервуару необхідно закладати на стадії проектування, враховуючи питання охорони праці та ідентифікації небезпек. Водночас ідентифікація небезпек ізотермічного зберігання СПГ вимагає аналізу досвіду експлуатації та конструктивних особливостей.

Ключові слова: скраплення, ізотермічний резервуар, випаровування, газ, зберігання, транспортування.

FEATURES OF CHOOSING ISOTHERMAL TANKS
FOR STORAGE OF LIQUEFIED NATURAL GASES

O.T. Chernova

Ph.D., Associate Professor at the “Transportation and Storage of Energy Carriers” Department,
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-6424-7569

Summary

Introduction. Nowadays, natural liquefied gas is very popular in all spheres of life – heating, cooking, transport and many others. And there are many reasons for this – environmental cleanliness, ease of use, low cost, and others. Natural gas deposits are not found in all corners of the Earth, so the problem of its transportation has arisen. As you know, gas under normal conditions is in the gaseous phase and occupies significant volumes. Liquefied natural gas or abbreviated LNG, as it is commonly called in the energy industry (Liquefied Natural Gas, abbreviated LNG) is ordinary natural gas cooled to a temperature of -162°C (the so-called liquefaction temperature) for storage and transportation in liquid form in the form. **Goal.** This article expands the analysis of the features of the selection of tanks for the storage of liquefied gases. Since liquefied gas is stored in isothermal tanks at the boiling temperature, which is maintained due to the evaporation of LNG, the choice of containers for LNG storage plays an important role in the transportation chain – gas delivery. Therefore, it is important to choose a safe and efficient LNG storage method. **The results.** The work presents the research of scientists on the problems of designing and operating storage facilities for LNG, statistical parameters of research, the dynamics of gas market development and the structure of changes in global capacity for LNG export, the issue of choosing a method of storing significant volumes of liquefied natural gases and the practice of building complexes, the classification of containers is characterized. The analysis of the tanks that are currently used in the implemented international projects showed that among the large-sized tanks, the most common designs are full sealing, but isothermal tanks with single sealing are in some cases no less competitive, providing the necessary level of storage security at a lower cost. **Conclusions.** This article shows that the choice of tank type must be made at the design stage, taking into account the issues of occupational safety and hazard identification. At the same time, identifying the dangers of isothermal storage of LNG requires an analysis of operating experience and design features.

Key words: liquefaction, isothermal tank, evaporation, gas, storage, transportation.

Вступ. Скраплювати природний газ люди навчилися на початку дев'ятнадцятого століття, коли Майкл Фарадей (відомий вчений у галузі електромагнетизму та електрохімії, чис ім'я увічнено в таких поняттях, як клітина Фарадея та одиниця вимірювання ємності СІ, Фарад) експериментував із різними типами газів. У 1820 році Фарадею вдалося перевести природний газ із газоподібного стану у рідкий, охолодивши його до температури 113 Кельвінів (-160°C).

Постановка проблеми. Нині скраплений природний газ (СПГ) відіграє все більш помітну роль на світовому ринку вуглеводнів. Зростання споживання СПГ зумовлене не тільки відсутністю або дефіцитом власних енергетичних ресурсів

в окремих країнах і регіонах, а й значними перевагами СПГ над іншими енергоносіями. По-перше, для здійснення поставки скрапленого природного газу немає необхідності будувати й обслуговувати систему газопроводів, в тому числі у важкодоступних районах. Основною перевагою СПГ є можливість транспортувати його на великі відстані морем, здійснювати трансокеанські поставки і реалізовувати на ринках з найбільш привабливими цінами. Це особливо актуально для України, яка прагне зміцнити енергетичну безпеку та диверсифікувати імпорту російського газу. По-друге, скраплений природний газ характеризується більш високою якістю порівняно з трубопровідним. Це зумовлено тим, що в процесі скраплення відбувається очищення газу від шкідливих домішок і сірчистих сполук, тому у результаті виходить практично чистий газ із високим вмістом метану. По-третє, СПГ є найбільш екологічно чистим з вуглеводневих джерел електроенергії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сьогодні світовий ринок скрапленого природного газу розвивається дуже швидко. З'являються нові експортери та імпортери, удосконалюються технології скраплення газу, застосовуються найсучасніші інноваційні рішення та розробки в галузі транспортування і зберігання СПГ, нарощуються виробничі та регазифікаційні потужності, модернізується флот танкерів-газовозів.

Науковими дослідженнями з проблем проектування й експлуатації сховищ СПГ займалися такі вчені, як Б.С. Рачевський, В.С. Сафонов, О.М. Іванцов, А.Д. Двоїріс, Є.І. Яковлев, Г.Е. Одішарія, Б.В. Поповський, А.З. Майлер, Ю.І. Дешевих, А. Гермелес, Д. Мідер, Д. Хістенд, Дж. Ши, К. Бедус, Д. Моріссон, С. Бейтс та ін.. Але більшість робіт було виконано в 70–80-ті роки минулого століття, у них відсутній комплексний аналіз термодинамічних режимів резервуарів для СПГ.

У 70-ті роки ХХ-го століття радянські вчені вели роботу зі створення науково-технічної та нормативної бази для об'єктів зберігання і транспорту СПГ, але в подальшому з об'єктивних причин ці роботи припинилися.

Формулювання цілей статті. Зміна складу та температури СПГ у кожному шарі при зберіганні можна оцінити завдяки застосуванню матеріального та енергетичного балансу до окремих шарів [6]. Модель дає гнучкість у виборі будь-якої кількості видів до максимум 10. Передбачається, що в шарі плівки не накопичується маса, а СПГ в ділянці плівки знаходиться в термодинамічній рівновазі з еволюційними парами.

Матеріальний баланс:

Нижній шар –

$$\frac{d}{dt} [c_l \delta_l x_l(i)] = \frac{M_l}{A \cdot x_l(i) - k(x_l(i) - x_u(i))}, \quad (1)$$

Верхній шар –

$$\frac{d}{dt} [c_u \delta_u x_u(i)] = \frac{M_u}{A \cdot x_u(i) - M_v y(i) - k(x_u(i) - x_l(i))}. \quad (2)$$

У вищезгаданому рівнянні (1) для нижнього шару швидкість зміни складу виду оцінюється шляхом розгляду молярної швидкості потоку вантажу в нижній шар резервуара. Матеріальний баланс для верхнього шару записується аналогічним чином для нижнього шару (2) з єдиним додатковим терміном для молярної

швидкості випаровування від верхнього шару до парового простору. Коефіцієнт молярного випаровування з верхньої поверхні полягає в тому, що

$$M_v = \left[\frac{M_R(\bar{H}_B - \bar{H}_S) + f_Q \left(\frac{Q}{A} \right)}{(\bar{H}_V - \bar{H}_B)} \right], \quad (3)$$

де f_Q – частка загального теплового потоку, що передається в паровий простір, який повертається у рідину. Припускається, що він становить 95% [1; 5].

$$Q = q_l + q_v \pi D \delta_{vs}. \quad (4)$$

Ентальпія рідини та парової фази корелює з точки зору температури, з якої можна оцінити питому теплоту. Кореляції для ентальпії рідини та парової фази отримані з підручника з природного газу Medici [2].

За своєю теплотвірною здатністю 1 л СПГ еквівалентний 0,67 л бензину або 1,13 л дизельного палива. У даний час частка СПГ в балансі енергоносіїв невелика, але темпи зростання його споживання досить високі (близько 7% в рік, що удвічі вище, ніж для природного газу, і втричі, ніж для нафти) [3].

Виклад основного матеріалу. Під час проектування комплексів з підготовки та використання скрапленого природного газу неминує постає питання про вибір способу зберігання значних обсягів СПГ. Практика будівництва комплексів показує, що на частку резервуарів для зберігання СПГ припадає до 50% загальних капіталовкладень [4], тому аналіз та характеристика даного питання має важливе наукове та економічне значення.

Резервуари, які призначені для зберігання скраплених природних газів, фахівці класифікують за декількома ознаками:

- за конструктивним виконанням стінок резервуару – одностінні, двостінні, з внутрішньою мембраною;
- за конструктивним виконанням внутрішньої покрівлі – самонесучі та підвісні;
- за типом ізоляції – екранні, пористі, засипні, жорсткі;
- за вживаним матеріалом – металеві, залізобетонні, комбіновані.

Залежно від розташування резервуарів відносно поверхні материкового ґрунту сховища СПГ можуть бути підземні та надземні [8].

Аналіз показує, що в міжнародній практиці найбільшого поширення набули надземні вертикальні ізотермічні резервуари (ІР). Класифікація ІР для скрапленого природного газу за конструктивним виконанням наведена на рисунку 1.

Ізотермічні резервуари одинарної герметизації складаються з внутрішньої металевої ємності, непроникної для рідини, і зовнішньої ємності, непроникної для пари, що захищає теплову ізоляцію від атмосферних впливів [7]. Ізотермічні резервуари подвійної герметизації також складаються з внутрішньої металевої ємності, непроникної для рідини, і зовнішньої ємності. Зовнішня ємність відкрита зверху і, відповідно, не може перешкоджати витоку парів продукту. Міжстінний простір може накриватися «дошовим щитом» для захисту від опадів. У мембранних резервуарах внутрішня ємність являє собою виготовлену з аустенітної сталі оболонку товщиною не менше 1,2 мм, гофровану в двох взаємно перпендикулярних напрямках. Система гофрування допускає розширення і стиснення при теплових навантаженнях. Внутрішня поверхня не є повністю несучою, а спирається на

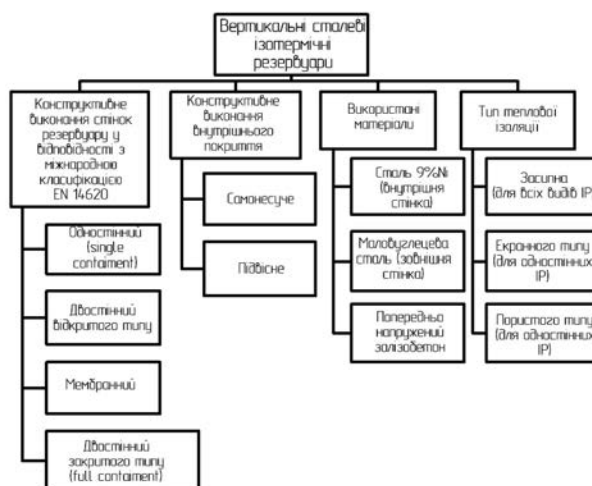


Рис. 1. Класифікація ізотермічних резервуарів для СПГ за конструктивним виконанням

тверду теплову ізоляцію, щільно прилягає до зовнішньої стінки. Зовнішня ємність складається із залізобетонної фундаментної плити, стінки з попередньо напруженого бетону і залізобетонного даху куполоподібної форми. Несуча здатність ємності забезпечується спільною роботою трьох таких шарів: внутрішньої стінки, теплоізоляції та зовнішньої стінки.

Резервуари закритого типу (або повної герметизації) складаються з непроникної для рідини внутрішньої ємності і зовнішньої ємності, непроникної для рідини і пари. Внутрішня поверхня може бути відкритою зверху або мати підвісне покриття. Зовнішня ємність являє собою сталевий або залізобетонний резервуар, оснащений купольною покрівлею, що розрахована на комбіноване виконання таких функцій [8]:

- в режимі штатної експлуатації служити як первинна парова герметизація резервуара (у випадку внутрішньої ємності з відкритою покрівлею) і містити в собі теплоізоляцію внутрішньої ємності;

- в разі розгерметизації внутрішньої ємності локалізувати розлиття СПГ і зберегти паронепроникність конструкції. Допускається викид парів в атмосферу за умови його контролю системою захисту від надлишкового тиску. Для сприйняття тиску рідини при розгерметизації внутрішньої ємності зовнішня залізобетонна стіна виконується з попереднім напруженням.

Напруження залізобетонної стінки здійснюється за допомогою пучків високоміцних сталевих канатів, прокладених у спеціальних внутрішніх жолобах і замоноличених розчином після натягу. Зовнішня ємність, виготовлена з попередньо напруженого залізобетону, повинна мати сталеве облицювання на внутрішній поверхні для забезпечення газонепроникності.

Для захисту від зовнішнього теплопритоку, що сприяє випаровуванню СПГ, застосовують теплоізоляцію. У конструкціях повної герметизації міжстінний простір заповнюється тепловою ізоляцією зі спученого перлітового піску. Для

часткової компенсації температурних деформацій внутрішньої ємності додатково влаштовується шар теплоізоляції з еластичного мінерального войлоку в обкладанні з металеві сітки на всій зовнішній поверхні ємності. У конструкціях ІР одинарної герметизації застосовують теплоізоляцію екранного або пористого типу.

Для захисту від атмосферних впливів ізоляцію обшивають тонкостінними алюмінієвими листами [9].

Вищеописані конструкції резервуарів наведені на рисунку 2.

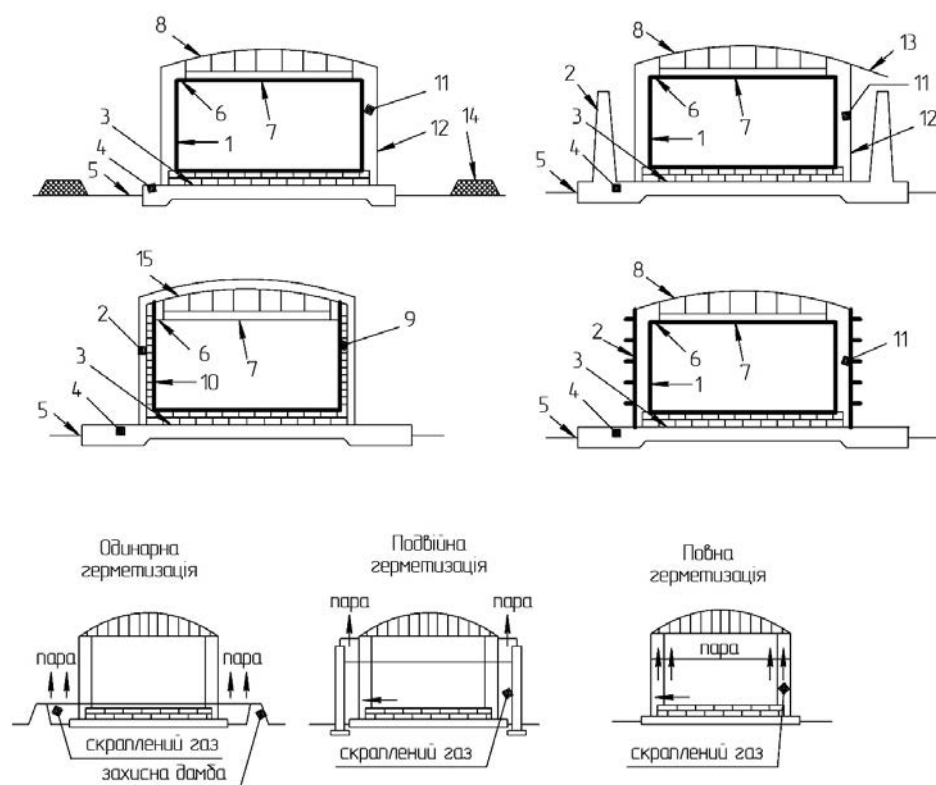


Рис. 2. Конструктивне виконання ізотермічних резервуарів
 а) одинарна герметизація; б) подвійна герметизація; в) мембранний резервуар;
 г) повна герметизація; д) схема герметизації ІР при витіканні продукту;
 1 – первинний контейнер (сталевий); 2 – вторинний контейнер, розрахований на утримання від розлиття продукту; 3 – ізоляція дна;
 4 – фундамент; 5 – система обігріву фундаменту; 6 – гнучке ізоляційне ущільнення; 7 – підвісне перекриття (ізольоване); 8 – стаціонарне накриття;
 9 – несуча теплоізоляція; 10 – мембрана; 11 – засипна теплова ізоляція;
 12 – зовнішня сталева оболонка, не здатна утримувати рідину; 13 – покриття «дощовий щит»; 14 – захисна дамба; 15 – залізобетонне покриття

Незалежно від типу герметизації резервуара покриття складається з зовнішньої купольної покрівлі, що спирається на корпус зовнішньої ємності, і внутрішнього підвісного перекриття, яке становить плоску конструкцію, підвішену до зовнішньої покрівлі над внутрішньою ємністю і несучою теплоізоляцією. Підвісна

покрівля кріпиться до крокв стаціонарної зовнішньої покрівлі за допомогою підвісок. В IP повної герметизації з підвісною покрівлею пари продукту вільно проникають в міжстінний простір, внаслідок чого надлишковий тиск газу приймає також і зовнішня ємність.

Конструкція зовнішньої покрівлі залежить від матеріалу зовнішнього корпусу [10]. При металевому корпусі в системах одинарної і повної герметизації купольна покрівля виконується з вуглецевої сталі з розрахунковою температурою експлуатації, що дорівнює мінімальній середній температурі найхолоднішого дня.

Якщо зовнішня ємність виготовлена з перенапруженого залізобетону, то купольна покрівля також виконується із залізобетону, монолітно сполученого з корпусом. Внутрішня поверхня всієї купольної покрівлі повинна бути облицьована вуглецевою сталлю для забезпечення герметичності і запобігання витоків пари СПГ. Каркас сталевого облицювання повинен мати достатню несучу здатність, щоб утримувати навантаження від ваги м'якого бетону в процесі його укладання та твердіння.

Фундаменти ізотермічних резервуарів мають два конструктивних рішення: фундамент на сваях, що складається зі свайового поля та монолітного фундаменту, який має нижню та верхню залізобетонні плити, з'єднані між собою колонами. Фундаменти передбачають наявність провітрюваного простору між плитами і ґрунтом. У разі використання залізобетонної зовнішньої ємності фундаментна плита є інтегрованою частиною ємності і жорстко пов'язана із зовнішньою стінкою [11].

Для запобігання підйому країв дна внутрішньої ємності під дією надлишкового тиску по периметру нижнього пояса внутрішньої ємності встановлюються анкерні кріплення.

Для здійснення всіх необхідних технологічних операцій при експлуатації IP обладнується відповідними патрубками. У сучасних закордонних конструкціях IP врізки і патрубки в дні і стінці резервуара (як зовнішніх ємностей, так і внутрішньої ємності) не дозволяються.

Під час проведення технологічних операцій зливу, наливу продукту, а також у процесі зберігання СПГ надлишковий тиск газу може відхилитися від проектної величини в бік вакууму або ж, навпаки, в бік підвищення. З цією метою конструкція IP передбачає запобіжні клапани тиску і вакууму. Запобіжні клапани повинні розташовуватися на віддаленій відстані від майданчиків обслуговування основного обладнання та насосів для безпеки в разі виникнення пожежі на клапані в момент його спрацювання [9].

Крім конструктивного виконання ізотермічних резервуарів, важливим аспектом безпечного зберігання СПГ є вибір резервуарних сталей. Необхідність зберігання СПГ при від'ємних температурах висуває підвищені вимоги до механічних характеристик резервуарних сталей. Для зменшення ймовірності крихкого руйнування при від'ємних температурах сталь повинна мати достатню ударну в'язкість, за якою судять про її морозостійкість.

Для виготовлення резервуарів з температурою зберігання продуктів до мінус 104°C застосовується сталь, що містить 6% нікелю, нижче -104 °C – сталь, що містить 9% нікелю (наприклад, сталь ASTM A553 тип I або аналогічна російська

сталь 0Н9), а також аустенітна нержавіюча сталь. Для виготовлення зовнішньої металевої ємності або металевого герметизуючого зварного облицювання залізо-бетонної стінки застосовується вуглецева сталь. Мінімальна розрахункова температура металу зовнішньої ємності і облицювання приймається залежно від кліматичних умов [10].

Типи сталей, що застосовуються для конструкцій ізотермічних резервуарів для скраплених природних і вуглеводневих газів залежно від температури продукту, наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Типи сталей, що застосовуються для конструкцій ізотермічних резервуарів

Продукт	Температура ізотермічного зберігання, °С	Тип сталі
Пропан	-42,1	Різні групи вуглеводневої сталі
Пропілен	-47,7	
Ацетилен	-84	3,5% Ni
Етан	-88,4	
Етилен	-103,8	5% Ni
Метан (СПГ)	-163	9% Ni

Нижче в таблиці 2 наведено список найбільш значущих міжнародних проєктів ізотермічних резервуарів для зберігання СПГ, реалізованих компаніями TGE Gas Engineering (Німеччина), CB&I (США) и KOGAS (Південна Корея) в період з 2004 до 2014 р.

Таблиця 2

Реалізовані міжнародні проєкти ізотермічних резервуарів СПГ

Тип, кількість і місткість (м ³) резервуарів	Рік вводу в експлуатацію	Розташування об'єкту	Власник
Повна герметизація, 9x200000	2014	Самчок, Південна Корея,	Korea Gas Corp., Korea
Повна герметизація, 2x180000	2013	Джуронг-Айленд, Сінгапур	Singapore LNG Pte. Ltd.
Повна герметизація, 3x160000	2012	Нінбо, Чжецзян, Китай	CNOOC Ningbo LNG Co., Ltd
Повна герметизація, 150000	2012	Сінш, Португалія	REN Atlbntico
Одиарна герметизація, 30,000	2012	Мунай, Китай	Xinjiang Ji Munai Guanghui LNG Development Ltd. Co.
Повна герметизація, 2x20000	2012	порт усть-луга, росія	Sibur Portenegro
Одиарна герметизація, 30000	2011	Іу, Чжецзян, Китай	Xinjiang Guanghui New Energy Co. Ltd.
Повна герметизація, 9x200000	2014	Самчок, Південна Корея,	Korea Gas Corp., Korea
Повна герметизація, 2x180000	2013	Джуронг-Айленд, Сінгапур	Singapore LNG Pte. Ltd.
Повна герметизація, 3x160000	2012	Нінбо, Чжецзян, Китай	CNOOC Ningbo LNG Co., Ltd

Продовження таблиці 2

Тип, кількість і місткість (м ³) резервуарів	Рік вводу в експлуатацію	Розташування об'єкту	Власник
Повна герметизація, 150000	2012	Сініш, Португалія	REN Atlvntico
Одинарна герметизація, 30,000	2012	Мунай, Китай	Xinjiang Ji Munai Guanghui LNG Development Ltd. Co.
Повна герметизація, 2×20000	2012	порт усть-луга, росія	Sibur Portenegro
Одинарна герметизація, 30000	2011	Іу, Чжецзян, Китай	Xinjiang Guanghui New Energy Co. Ltd.
Повна герметизація, 2×160000	2008	Фуцзянь, Китай	CNOOC Gas & Power Group's
Одинарна герметизація, 70500	2008	Канада	Terasen Gas (піковий термінал)
Повна герметизація, 2×150,000	2007	Мургадос, Ла-Корунья, Іспанія	Reganosa
Одинарна герметизація, 2×130 000	2007	Перу	Peru LNG
Повна герметизація, 2×125000 СПГ	2006	Хаммерфест, Норвегія	Statoil ASA, Norway
Повна герметизація, 2×160000	2006	Порт Лавака, Техас, США	Calhoun LNG, LP
Повна герметизація, 3×160000	2005	Кітімат, Канада	Kitimat LNG Inc., Canada
Подвійна герметизація, 1×160000	2004	Домінікана	AES Corporation (імпорт СПГ)
Тип, кількість і місткість (м ³) резервуарів	Рік вводу в експлуатацію	Розташування об'єкта	Власник
Одинарна герметизація, 2×140000	2004	США	Trunkline (імпорт СПГ)
Повна герметизація, 1×60000	2004	Уотербері, Коннектикут	Yankee Gas Service Company

Висновки. Аналіз даних реалізованих міжнародних проєктів показав, що серед великогабаритних резервуарів найбільш поширені конструкції повної герметизації, проте IP одинарної герметизації, що забезпечують необхідний рівень безпеки зберігання за нижчої вартості, у деяких випадках є не менш конкурентоспроможними.

Конструктивні рішення на стадії проєктування приймаються з огляду на джерела небезпеки ізотермічного зберігання і сценаріїв реалізації аварійних ситуацій, тобто на підставі ідентифікації небезпек.

Ідентифікація небезпек ізотермічного зберігання СПГ вимагає аналізу досвіду експлуатації, основних і допоміжних технологічних процесів на об'єкті, компонувальних рішень і конструктивних особливостей обладнання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Heestand J., Shipman C.W., Meader J.W. A predictive model for rollover in stratified LNG tanks. *AIChEJ*. 29 March 1983. P. 199–207. doi.org/10.1002/aic.690290205.
2. Klosek J., McKinley C. Densities of liquefied natural gas and of low molecular weight hydrocarbons. *First International Conference on LNG*. Institute of Gas Technology. Chicago, 1977. 15 p.
3. Дзьоба О.Г. Основні тенденції формування світового ринку скрапленого природного газу. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2009. № 3 (21). С. 117–125.
4. Janisch J., Raabe G., Köhler J. Vapor-liquid equilibria and saturated liquid densities in binary mixtures of nitrogen, methane, and ethane and their correlation using the VTPR and PSRK GCEOS. 2007. P. 1897–1903. doi.org/10.1021/jc700210n.
5. Мала гірнича енциклопедія : у 3 т. /за ред. В.С. Білецького. Донецьк : Донбас, Т. 1 : А–К. 2004. 640 с. ISBN 966-7804-14-3.
6. Хімія і фізика горючих копалин / В.І. Саранчук, М.О. Ільяшов, В.В. Ошовський, В.С. Білецький. Донецьк : Східний видавничий дім. 2008. 600 с. ISBN 978-966-317-024-4.
7. Українська нафтогазова енциклопедія / за заг. ред. В.С. Іванишина. Львів : Сполом. 2016. 603 с. ISBN 978-9669-191-403.
8. ДСТУ 4312:2012 Протипожежна техніка. Системи газового пожежогасіння. Модулі ізотермічні. Загальні технічні умови. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=54571.
9. Чернова О.Т., Кривенко Г.М. Аналіз небезпек під час зберігання скраплених вуглеводневих газів. *Екологічні науки*. 2023. № 2 (47). С. 112–116. doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.2-47.18ф.
10. Чернова О.Т., Кривенко Г.М. Аналіз небезпек під час розриву автоцистерни. *Розвиток транспорту*. 2021. № 4 (11). 2021. С. 112–116. doi.org/10.33082/td.2021.4-11.12. Ст. 129–136
11. R. Lentner, M. Richter, R. Kleinrahm, R. Span. Density measurements of liquefied natural gas (LNG) over the temperature range from (105 to 135) K at pressures up to 8.9 MPa. 2017. P. 68–76. doi.org/10.1016/j.jct.2017.04.002.

REFERENCES

1. J. Heestand, C.W. Shipman, J.W. Meader. (March 1983). A predictive model for rollover in stratified LNG tanks, *AIChEJ* 29. P. 199–207. doi.org/10.1002/aic.690290205.
2. J. Klosek, C. McKinley. (1977). Densities of liquefied natural gas and of low molecular weight hydrocarbons. In: *First International Conference on LNG*. Institute of Gas Technology. Chicago. 15 p.
3. Dzhoba O.G. (2009). The main trends in the formation of the world market of liquefied natural gas [Osnovni tendentsii formuvannia svitovoho

- rynku skraplenoho pryrodnoho hazu]. IFNTUNG scientific bulletin. No. 3(21). P. 117–125. [in Ukrainian].
4. J. Janisch, G. Raabe, J. Köhler. (2007). Vapor-liquid equilibria and saturated liquid densities in binary mixtures of nitrogen, methane, and ethane and their correlation using the VTPR and PSRK GCEOS. P. 1897–1903. doi.org/10.1021/je700210n.
 5. Small mining encyclopedia: in 3 volumes [Mala hirnycha entsyklopediia: u 3 t.]/ed. V. S. Biletskyi.(2004). D.: Donbas, Volume 1: A–K. 640 p. ISBN 966-7804-14-3. [in Ukrainian].
 6. V.I. Saranchuk, M.O. Ilyashov, V.V. Oshovskyi, V.S. Biletskyi. (2008). Chemistry and Physics of Combustible Fossils [Khimiiia i fizyka horiuchykh kopalyn]. Donetsk: Eastern Publishing House. 600 p. ISBN 978-966-317-024-4. [in Ukrainian].
 7. Ukrainian oil and gas encyclopedia [Ukrainska naftohazova entsyklopediia]/ edited by V. S. Ivanyshin (2016). Lviv: Spolom. 603 p. ISBN 978-9669-191-403. [in Ukrainian]
 8. DSTU 4312:2012 (2012). Fire-fighting equipment. Gas fire extinguishing systems. The modules are isothermal. General technical conditions [Protypozhezhna tekhnika. Systemy hazovoho pozhezhohasinnia. Moduli izotermichni. Zahalni tekhnichni umovy]. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=54571. (effective date 1.03.2012). [in Ukrainian].
 9. Chernova O.T., Kryvenko H.M. (2023). Analysis of hazards during storage of liquefied hydrocarbon gases [Analiz nebezpek pid chas rozryvu avtotsystemny]. Scientific and practical magazine “Ecological Sciences”. №2 (47). 2023. P. 112–116. doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.2-47.18. [in Ukrainian].
 10. Chernova O.T., Kryvenko H.M. (2021). Analysis of hazards during the rupture of a tank truck [Analysis of hazards during the rupture of a tank truck]. Transport development. No. 4(11). P. 112–116. [in Ukrainian].doi.org/10.33082/td.2021.4-11.12 .Ст.129-136.[in Ukrainian].
 11. R. Lentner, M. Richter, R. Kleinrahm, R. Span. (2017). Density measurements of liquefied natural gas (LNG) over the temperature range from (105 to 135) K at pressures up to 8.9 MPa. P. 68–76. doi.org/10.1016/j.jct.2017.04.002.

Наукове видання

РОЗВИТОК ТРАНСПОРТУ

Науковий журнал

Випуск 1(20), 2024

Засновник – Одеський національний морський університет

*Українською
та англійською мовами*

Видається з жовтня 2016 р.

Формат 70×108/16. Гарнітура Times New Roman.
Папір офсет. Цифровий друк. Ум. друк. арк. 9,24.
Замов. № 0524/327. Наклад 200 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»
65101, Україна, м. Одеса, вул. Інглєзі, 6/1
Телефони: +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08
E-mail: mailbox@helvetica.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 7623 від 22.06.2022 р.

Scientific publication

TRANSPORT DEVELOPMENT

Scientific journal

Issue 1(20), 2024

Founded by Odessa National Maritime University

In Ukrainian and English

Since October 2016

Format 70×108/16. Times New Roman Font.
Offset. Digital printing. Conventional printed sheet 9,24.
Order No 0524/327. Edition of 200 copies.

Publishing House “Helvetica”
65101, Ukraine, Odessa, 6/1 Inglizi St.
Phone: +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08
E-mail: mailbox@helvetica.ua
Certificate of publishing entity
ДК № 7623 as of 22.06.2022