

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І
НАУКИ УКРАЇНИ**

**Державний вищий
навчальний заклад
«ПРИАЗОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ
ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»
(ДВНЗ «ПДТУ»)**

**p-ISSN 2225-6733
e-ISSN 2519-271X**

***ВІСНИК
ПРИАЗОВСЬКОГО
ДЕРЖАВНОГО
ТЕХНІЧНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ***

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

**Видається 2 рази на рік
з 1995 року**

Випуск 44

Серія: Технічні науки

Дніпро, 2022

**MINISTRY OF EDUCATION AND
SCIENCE OF UKRAINE**

**State higher
educational institution
«PRIAZOVSKYI STATE
TECHNICAL UNIVERSITY»
(SHEI «PSTU»)**

**p-ISSN 2225-6733
e-ISSN 2519-271X**

***REPORTER
OF THE PRIAZOVSKYI
STATE
TECHNICAL
UNIVERSITY***

**COLLECTION OF SCIENTIFIC
WORKS**

**Published twice a year,
since 1995**

Issue 44

Section: Technical sciences

Dnipro, 2022

УДК 06.055.2

Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. праць. Вип. 44. – Дніпро: ДВНЗ «Приазов. держ. техн. ун-т», 2022. – 101 с. – (Технічні науки). – Режим доступу: <https://doi.org/10.32782/2225-6733.44.2022>.

У збірнику публікуються результати теоретичних та експериментальних досліджень вчених вищого навчального закладу та провідних спеціалістів у галузі технічних наук, показаний їхній вклад у розвиток науки та сучасних технологій. Публікації видання зберігаються на офіційному сайті Національної бібліотеки України імені В.І. Вернадського.

Головний редактор

Чигарьов Валерій Васильович *д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «ПДТУ»*

Заст. головного редактора

Матвієнко Володимир Миколайович *д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «ПДТУ»*

Відповідальний секретар

Савенко Ольга Сергіївна *канд. техн. наук, ДВНЗ «ПДТУ»*

Редакційна колегія

Angeliki G. Lekatou	<i>Dr., PhD, University of Ioannina (UOI), Greece</i>
Hossam Ahmed Mohamed Halfa	<i>Dr., PhD, Central Metallurgical R&D Institute (CMRDI), Cairo, Egypt</i>
Sergey Edward Lyshevski	<i>Dr., PhD, Rochester Institute of Technology, New York, USA</i>
Белоконь Каріна Володимирівна	<i>канд. техн. наук, доцент, Запорізька державна інженерна академія</i>
Білоусов Євген Вікторович	<i>канд. техн. наук, доцент, Херсонська державна морська академія</i>
Бурлака Володимир Володимирович	<i>д-р техн. наук, доцент, ДВНЗ «ПДТУ»</i>
Бялобржеський Олексій Володимирович	<i>канд. техн. наук, доцент, КрНУ ім. Михайла Остроградського</i>
Володарець Микита Віталійович	<i>канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «ПДТУ»</i>
Грищук Ігор Валерійович	<i>д-р техн. наук, професор, Херсонська державна морська академія</i>
Губинський Михайло Володимирович	<i>д-р техн. наук, професор, Національна металургійна академія України</i>
Гулаков Сергій Володимирович	<i>д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «ПДТУ»</i>
Єфременко Василь Георгійович	<i>д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «ПДТУ»</i>
Жежеленко Ігор Володимирович	<i>акад., д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «ПДТУ»</i>
Клецька Ольга Віталіївна	<i>канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «ПДТУ»</i>
Ковалевська Олена Сергіївна	<i>канд. техн. наук, доцент, Донбаська державна машинобудівна академія</i>
Кухар Володимир Валентинович	<i>д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «ПДТУ»</i>
Лук'яненко Анна Олегівна	<i>канд. техн. наук, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України</i>
Мазур Владислав Олександрович	<i>канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «ПДТУ»</i>
Мамедов Аріф Тапдиг огли	<i>д-р техн. наук, професор, Азербайджанський технічний університет</i>
Парфененко Юлія Вікторівна	<i>канд. техн. наук, доцент, Сумський державний університет</i>
Петренко Тетяна Григорівна	<i>канд. техн. наук, доцент, Український державний університет залізничного транспорту</i>
Плахтій Олександр Андрійович	<i>канд. техн. наук, доцент, Український державний університет залізничного транспорту</i>
Поднебенна Світлана Костянтинівна	<i>д-р техн. наук, доцент, ДВНЗ «ПДТУ»</i>
Пятикоп Олена Євгенівна	<i>канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «ПДТУ»</i>
Саєнко Юрій Леонідович	<i>д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «ПДТУ»</i>
Ткачов Віктор Васильович	<i>д-р техн. наук, професор, НТУ «Дніпровська політехніка»</i>
Чеберячко Юрій Іванович	<i>д-р техн. наук, професор, НТУ «Дніпровська політехніка»</i>

Коректори

Корчагіна Тетяна В'ячеславівна; Міхно Наталя Анатоліївна

Адреса: ДВНЗ «ПДТУ», проспект Дмитра Яворницького, 19, м. Дніпро, Дніпропетровська обл., 49005, Україна.

Address: PSTU, Dmytro Yavornytskyi Avenue 19, Dnipro, 49005, Ukraine.

Телефон редакції: (098) 480-24-03.

E-mail: vestnik.pgту@gmail.com (для надсилання статей).

Зареєстрований Міністерством Юстиції України 21.06.2011 р., Свідоцтво КВ № 17950 – 6800 ПР. Збірник входить до переліку наукових фахових видань (категорія «Б»), в якому можуть публікуватися основні результати дисертаційних робіт, згідно з Наказами Міністерства освіти і науки України № 409 від 17.03.2020, № 886 від 02.07.2020. Видається два рази на рік.

Рекомендовано до друку Вченою Радою ДВНЗ «ПДТУ», протокол № 8 від 26.05.2022 р.

ISSN 2225-6733 (Print), ISSN 2519-271X (Online)

© ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» (ДВНЗ «ПДТУ»), 2022

ЗМІСТ

CONTENTS

**КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ ТА
ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ**

**COMPUTER SCIENCE AND
INFORMATION TECHNOLOGY**

Котихова Л.Д.

Дослідження використання ІТ для протидії поширенню російської дезінформації в медіапросторі в умовах війни

5

L.D. Kotykhova

Study of the use of IT to counter the spread of russian disinformation in the media space in war conditions

МЕТАЛУРГІЯ

METALLURGY

Дан Л.О., Трофімова Л.О.

Аналіз технологічних параметрів виготовлення литих композиційних матеріалів з матрицею з легких сплавів

10

L.O. Dan, L.O. Trofimova

Analysis of technological parameters of cast composite materials with a matrix of light alloys manufacture

**Кривенко В.В., Чупринов Є.В.,
Олійник Т.А., Харітонов В.М.,
Реков Ю.В.**

Дослідження технологічних властивостей проби ефіопської залізної руди аравійсько-нубійського щита. Частина 1. Дослідження речовинного складу проби руди

20

**V.V. Krivenko, E.V. Chuprinov,
T.O. Oliynik, T.A. Haritonov,
Y.V. Rekov**

Study of technological properties of the sample ethiopian iron ore of the arabian-nubian shield. Part 1. Study of the substance composition of the ore sample

**ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА,
ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА
ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА**

**ELECTRICAL ENGINEERING AND
ELECTROMECHANICS**

Лисяк В.Г.

Динамічні режими паралельно працюючих асинхронних відцентрових гідроагрегатів електротехнічного комплексу насосної станції

28

V.H. Lysiak

Dynamic modes of parallel asynchronous centrifugal hydraulic units of the electrotechnical complex of the pumping station

ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА

HEAT POWER ENGINEERING

Хаджинов Є.О., Хаджинов О.С.

Експериментальне дослідження горіння одиночних вуглецевих частинок в середовищах O_2/H_2O та O_2/N_2O

37

Y.A. Khadzhynov, O.S. Khadzhynov

Experimental study of the combustion of single carbon particles in the atmospheres O_2/H_2O and O_2/N_2O

**ТЕХНОЛОГІЯ ЗАХИСТУ
НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

**ENVIRONMENTAL PROTECTION
TECHNOLOGY**

Волошин В.С.

Чи варто шукати «золоті пропорції» Фібоначчі в процесах утворення відходів

43

V.S. Voloshyn

Should we look for Fibonacci's «golden ratio» in the processes of waste formation

Волошин В.С.

Динамічна стійкість та управління надмолекулярними структурами води

V.S. Voloshyn

Dynamic stability and management of supramolecular structures of water

53

РІЧКОВИЙ ТА МОРСЬКИЙ ТРАНСПОРТ

RIVER AND SEA TRANSPORT

Агєєв М.С., Черненко В.В.

Розробка та реалізація концепції забезпечення надійності відновлюваних деталей засобів транспорту в процесі ремонту на базі системного аналізу

62

M.S. Ahieiev, V.V. Chernenko

Development and implementation of the concept of ensuring the reliability of recoverable parts of means of transport during the repair process based on a system analysis

ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

RAILWAY TRANSPORT

Фомін О.В., Ловська А.О.

Визначення навантаженості несучої конструкції вагона-цистерни з пружно-фрикційною хребтовою балкою

73

O.V. Fomin, A.O. Lovska

Determination of load-carrying capacity of tank wagon with a loaded-friction spine girder

**Фомін О.В., Ловська А.О.,
Сова С.С., Литвиненко А.С.**

Комп'ютерне моделювання температурної навантаженості несучої конструкції вагона-хопера

81

**O.V. Fomin, A.O. Lovska,
S.S. Sova, A.S. Lytvynenko**

Computer modeling of the temperature resistance of the load-bearing structure of the hopper car

**Болжеларський Я.В., Джус В.С.,
Джус О.В., Клецька О.В.,
Кіріцева О.В.**

Оцінка вимог інтероперабельності до українських вагонів-цистерн, які призначені для перевезення небезпечних вантажів залізничним транспортом

89

**Y. Bolzhelarskyi, V. Dzhus,
O. Dzhus, O.V. Kletska,
O.V. Kiritseva**

Evaluation of interoperability to Ukrainian tank cars, as they are recognized for the transportation of non-healthy cargoes by railway transport

ДО УВАГИ АВТОРІВ

101 INTO CONSIDERATION OF AUTHORS

122 КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 004.738.5

doi: 10.32782/2225-6733.44.2022.1

© Котихова Л.Д.*

ДОСЛІДЖЕННЯ ВИКОРИСТАННЯ ІТ ДЛЯ ПРОТИДІЇ ПОШИРЕННЮ РОСІЙСЬКОЇ ДЕЗІНФОРМАЦІЇ В МЕДІАПРОСТОРІ В УМОВАХ ВІЙНИ

В умовах повномасштабної війни Росії проти України важливу роль відіграє її інформаційна складова. Крім боротьби безпосередньо на фронті, зараз триває й інформаційна війна. Російська влада використовує всі можливі засоби для сіяння паніки, дезорієнтації та дезінформації серед українців. Основним джерелом поширення маніпулятивного контенту та дезінформації є соціальні мережі та інтернет-ресурси. Проблема протидії дезінформації виступає одним з найважливіших й найактуальніших сьогочасних питань. Бо для перемоги над ворогом, окрім перемоги саме армії, необхідно також одержати перемогу й на інформаційному фронті, тобто повернути свідомість частини українців у національний медіапростір. Зараз замість підходів, що розглядають проблему протидії дезінформації з точки зору інформаційної політики, більш дієвими є підходи з використанням сучасних інформаційних технологій. Для виявлення та нейтралізації загроз в інформаційному просторі з початком війни Міністерством цифрової трансформації України було створено ІТ-армію України, що є об'єднанням спеціалістів інформаційних технологій, фахівців у сфері цифрового розвитку та діджиталізації та волонтерів. Кібервійська України на своєму фронті протидіють дезінформації з боку РФ. Таким чином, ІТ-армія України відіграє важливу роль у наблизенні перемоги над країною-агресором. Стаття присвячена аналізу способів використання ІТ для протидії поширенню російської пропаганди та дезінформації в українському медіапросторі в умовах війни. У статті розглянуто терміни «пропаганда», «фейк» та «дезінформація», представлено методи поширення неправдивої інформації в інформаційному просторі, описано способи протидії ворогу, що використовують воїни кіберармії.
Ключові слова: ІТ-армія, кіберармія, пропаганда, дезінформація, фейки, війна, соціальні мережі, Інтернет.

L.D. Kotykhova. Study of the use of IT to counter the spread of russian disinformation in the media space in war conditions. In the face of a full-scale war of Russia against Ukraine, an important role is played by information war. The Russian authorities use all possible ways of sowing panic, disorientation and misinformation among Ukrainians. The main source of spreading manipulative content and misinformation is social networks and Internet resources. The problem of counteracting misinformation is one of the most important and relevant today's issues. Because to win the enemy, in addition to the victory of the army, it is also necessary to win on the information front, namely, to return the consciousness of part of Ukrainians to the national media space. Now, instead of approaches that consider the problem of counteracting misinformation in terms of information policy, approaches using modern information technologies are more effective. In order to identify and neutralize threats in the information space with the outbreak of the war, the Ministry of Digital Transformation of Ukraine created an IT-army of Ukraine,

* асистент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, kotykhova_l_d@pstu.edu

which is an association of information technology specialists, specialists in the field of digital development and digitalization and volunteers. Ukrainian cyber military on their front counteract misinformation from the Russian Federation. Thus, the IT-army of Ukraine plays an important role in approaching the victory over the aggressor country. The article is devoted to the analysis of methods of using IT to counteract the spread of Russian misinformation in media space in war. The article examines the terms «propaganda», «fake» and «disinformation», presents the methods of spreading false information in the information space, describes the ways of countering the enemy used by the soldiers of the cyber army.

Keywords: IT-army, cyber army, propaganda, misinformation, fakes, war, social networks, Internet.

Постановка проблеми. З початком повномасштабного наступу країни-агресора на Україну інформаційний простір заповнила нова хвиля новин, що розповсюджують дезінформацію серед населення. Метою такого розповсюдження є дестабілізація внутрішньої ситуації в країні, створення панічних настроїв серед українців, поляризація суспільства та зміна громадської думки населення.

Російські інформаційні ресурси активно розповсюджують маніпулятивні новини, що здебільшого намагаються дискредитувати Збройні сили України в очах громадськості, а також зобразити в негативному світлі українців з територій, де ведуться активні бойові дії, та з тимчасово окупованих територій [1].

Пропаганда – це спосіб цілеспрямованого впливу та засіб змінення ставлення людей до певного явища чи події за допомогою розповсюдження спеціально підготовлених повідомлень через інформаційні ресурси [2].

Дезінформацією є спосіб впливу на людей через надання неправдивої інформації.

Фейком є інформація, що є повністю або частково недостовірною, яку видають за реальну новину.

Пропаганда та поширення дезінформації й фейків є важливими інструментами ведення інформаційної війни.

У плані оборони України та Зведеному плані територіальної оборони України від 24 лютого 2022 року вказано, що повномасштабне застосування Росією воєнної сили проти України «може супроводжуватись інформаційними кампаніями, інформаційно-психологічними операціями, кіберопераціями та спеціальними операціями проти України» [3].

Тому питання протидії інформаційним операціям Росії, а також питання збереження цілісності українського національного медіапростору, набуває особливої актуальності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сьогодні проводяться активні дослідження з ведення інформаційної війни та функціонування засобів масової інформації (ЗМІ) під час війни, бо ця проблема є надважливою.

Мельникова-Курганова О.С. під час вивчення особливостей комунікацій в блокадному Маріуполі звертає увагу на те, що «комунікація в суспільстві під час воєнних дій трансформується», а загарбники продовжують вести інформаційну боротьбу як в традиційному інформаційному просторі, так і в Інтернеті [4].

Калниболотська Є.В. називає пропаганду «некінетичним методом ведення війни у формі інформаційної атаки» [2].

Воронко О.Ю. зазначає в своїй роботі [5], що вміння протистояти пропаганді є «життєво необхідним для подальшого існування української незалежності».

Багато науковців розглядало методи протидії пропаганді та дезінформації з точки зору інформаційної політики. Однак питанню використання в цій боротьбі ІТ приділялося недостатньо уваги.

Мета дослідження – вивчення можливостей, що надають ІТ для протидії поширенню російської дезінформації в медіапросторі в умовах війни.

Виклад основного матеріалу. Росія використовує соціальні мережі та інтернет-ресурси для проведення інформаційних операцій, спрямованих проти України. Кантур О.М. зазначає, що «доступність і поширення соціальних мереж робить їх універсальним засобом для поширення дезінформації, пропаганди, мови ворожнечі тощо» [6].

Соціальні мережі та платформи, зокрема різноманітні канали, групи, чати та спільноти, стали майданчиком для ведення інформаційної війни. Дуже популярним є публікування «шок-контенту» на платформах Youtube, TikTok, Instagram та в месенджерах Viber й Telegram.

Медійні особи та відомі блогери з численною аудиторією часто за гроші підтримують у своїх дописах путінський режим. Також існують й акаунти новинних служб РФ, що дублюють у соціальних мережах пропаганду з телебачення.

Окрім цих організованих способів, до поширення дезінформації та пропаганди причетні й усі росіяни, які додають на свої сторінки посилання на фейкові дописи. Крім того, вони розпалюють суперечки та ворожнечу в коментарях під дописами та відео.

А, наприклад, в TikTok, де значну частину аудиторії становлять підлітки, створюються відео з проросійськими трендами на підтримку російської агресії.

Крім соціальних мереж значну роль у веденні інформаційної війни відіграють й сайти, що пов'язані з дезінформацією та війною в Україні. Це державні, новинні сайти, спеціалізовані інтернет-магазини з продажу військового обладнання, урядові системи та корпорації, картографічні та геоінформаційні системи тощо.

Окремою проблемою є обмеженість або взагалі відсутність правдивої інформації в зонах активних бойових дій та на тимчасово окупованих територіях. Черпак Т.В. у 2017 році розглянув у своїй роботі [7] інституційні проблеми інформаційної політики на сході України, де зауважує, що «діюча влада неодмінно має протистояти цій пропаганді на тимчасово окупованих територіях, не чекаючи їх звільнення українськими військовими». Але в сучасних умовах повномасштабної війни запропоновані ним засоби щодо вдосконалення українських ЗМІ вже не можуть бути настільки ефективними, бо зараз жителі, що знаходяться в зонах бойових дій чи на тимчасово окупованих територіях, знаходяться в ізоляції від українського контенту. Через це вони є найбільш вразливими до російської пропаганди та дезінформації.

Тому тепер одним з найбільш дієвих засобів протидії пропаганді є блокування пропагандистських інтернет-ресурсів та сторінок у соціальних мережах за допомогою кіберармії.

Українські кібервійська охороняють критичну інфраструктуру та мережі в Україні, відбивають ворожі хакерські атаки та наносять власні атаки на ресурси країни-агресора, займаються кібернетичним шпіонажем, проводять інформаційні кампанії щодо захисту України, а також протидіють розповсюдженню російської дезінформації [2]. Також вони займаються публікацією та оприлюдненням секретної російської інформації, отриманої за допомогою зламів, що може допомогти в боротьбі проти загарбницької політики Росії.

ІТ-армія України захищає український кібернетичний фронт, і, хоча їх діяльність іноді не так помітна, як дії Збройних сил України, вони відіграють важливу роль у наблизенні перемоги.

Українська ІТ-армія – це найпотужніша спільнота українських ІТ-фахівців, яку було створено спонтанно практично відразу після повномасштабного нападу РФ. Основним завданням ІТ-армії є створення DDoS-атак на проросійські інформаційні ресурси задля протидії окупантам. Бійці ІТ-армії здатні утримувати одночасно більше 800 цілей [8].

DDoS-атака (англ. distributed denial-of-service) – це розподілена хакерська атака, що спрямована на відключення певних сайтів. Програми для автоматизованих DDoS-атак після запуску надсилають величезну кількість запитів на зазначені цілі. Такі програми одночасно запускає велика кількість кібербійців, тому й запитів на кожен сайт-ціль надсилається така кількість, що сайти відмовляють й виходять з ладу.

ІТ-армія України складається з двох основних частин:

- волонтери, що влаштовують DDoS-атаки на різні інформаційні ресурси Росії.
- внутрішні групи, які виконують більш комплексні завдання [9].

Разом ці частини ІТ-армії відповідають за атакуючі дії для протидії поширенню дезінформації та виведення з роботи сайтів, що несуть загрозу для України. При цьому кібервоїнам потрібно бути обережними, аби не видати себе ворогам.

Окрім ІТ-спеціалістів й досвідчених хакерів в кіберармії є й новачки. Виконання кібератак різного рівня складності потребує різних навичок, до того ж, їх можна виконувати за допомогою різних варіантів програмних засобів. Тому кожен бажаючий може знайти варіант участі в кіберармії, який підійде йому за наявними в нього умовам й засобам. Й долучитися до ІТ-армії України можуть усі бажаючі, незалежно від їх навичок.

Кіберармія регулярно виконує автоматизовані системи атак на інформаційні ресурси та сервіси країни-ворога. Нові цілі та завдання формуються внутрішніми групами та керівництвом IT-армії. IT-фахівці регулярно вдосконалюють спеціальне програмне забезпечення для автоматизованих DDoS-атак, яке потім використовують й менш досвідчені кібервоїни.

Ще один засіб протидії поширенню російської дезінформації пропонує платформа «MRIYA» – синергія Кіберполіції України та волонтерів у протидії російським окупантам у медіапросторі [10].

Платформа співпрацює з підписниками, які блокують проросійські ресурси та деморалізують ворогів в соціальних мережах та платформах: Youtube, TikTok, Instagram, Viber, Telegram.

До цієї платформи також можуть приєднатися всі бажаючі. Окрім безпосереднього блокування ресурсів, кібервійці можуть й пропонувати для блокування за допомогою спеціального боту нові цілі, що займаються дезінформацією. IT-фахівці платформи також розробили й сервіс «MRIYA Automatic» для автоматизованої протидії російській агресії в Інтернеті.

Український кібернетичний фронт допомагають захищати хакери з усього світу. Наразі в складі кібервійськ України окрім українців є й громадяни інших країн.

Таким чином, завдяки злагодженій роботі українських IT-спеціалістів, Росії не вдається втілювати всі свої плани щодо ведення інформаційної війни.

Висновки

Отже, завдяки діяльності IT-армії України, платформи за підтримки Кіберполіції України, волонтерів та небайдужих громадян «MRIYA», а також низки інших кіберугруповань, Росія зазнає величезної кількості кібератак та поразок своїх інформаційних кампаній.

Таким чином, українські кібервоїни:

- надійно захищають український кібернетичний фронт;
- протистоять атакам та загрозам;
- виявляють та нейтралізують російську агресію в медіапросторі;
- протидіють поширенню дезінформації з боку Росії в мережі Інтернет;
- протидіють інформаційним загрозам в процесі повномасштабної війни Росії проти України;
- допомагають зберегти цілісність українського інформаційного простору.

Українські кібервійська роблять значний внесок в боротьбі з країною-агресором на інформаційному фронті.

Перелік використаних джерел:

1. Шульська Н.М. Медіаманіпуляції в умовах російсько-української війни (на прикладі локальних ЗМІ) / Н.М. Шульська, Р.С. Зінчук // Південний архів (філологічні науки). – 2022. – № 90. – С. 68-76. – Режим доступу: <https://doi.org/10.32999/ksu2663-2691/2022-90-9>.
2. Калниболотська Є.В. Забезпечення інформаційної безпеки України в соціальних мережах в умовах повномасштабної воєнної агресії Російської Федерації проти України / Є.В. Калниболотська. – Київ, 2022. – 69 с. – Режим доступу: <https://er.nau.edu.ua/handle/NAU/55680>.
3. Про введення в дію плану оборони України та Зведеного плану територіальної оборони України : Рішення Ради нац. безпеки і оборони України від 24 лютого 2022 р. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/n0033525-22#Text>.
4. Мельникова-Курганова О.С. Соціальні комунікації в блокадному Маріуполі: особливості, їх види, типи комунікаторів / О.С. Мельникова-Курганова // Інформація, комунікація, суспільство: матеріали 11-ї Міжнародної наукової конференції ICS-2022. – Львів: Видавництво Львівської політехніки. – 2022. – С. 182-183.
5. Воронко О.Ю. Пропаганда 2.0 / О.Ю. Воронко // Соціально-політичні студії : наук. альманах. – 2020. – № 4. – С. 15-19.
6. Кантур О.М. Актуальні проблеми протидії інформаційним загрозам у соціальних медіа під час повномасштабного вторгнення Росії в Україну / О.М. Кантур // Наукові записки Інституту законодавства Верховної Ради України. – 2022. – № 2. – С. 102-110. – Режим доступу: <https://doi.org/10.32886/instzak.2022.02.11>.

7. Черпак Т.В. Інституційні проблеми інформаційної політики на сході України / Т.В. Черпак // Вісник Дніпропетровського університету. – 2017. – № 1. – С. 86-95. – (Серія: Філософія. Соціологія. Політологія).
8. Офіційний сайт боротьби проти ворога на it-фронті – IT ARMY of Ukraine [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://itarmy.com.ua>.
9. Із кого і чого складається IT-армія України? Звіт Центру дослідження безпеки у Цюріху [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://dev.ua/news/it-armiya-ukrainy-1656515927>.
10. Канал «StopRussia | MRIYA» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://mriya.social/projects/channel>.

References:

1. Shulska N.M., Zinchuk R.S. Mediamanipuliatsiï v umovakh rosiis'ko-ukraïns'koï viïni (na prikladï lokal'nikh ZMI) [Media manipulation in the conditions of the Russian-Ukrainian war (on the example of local mass media)]. *Pivdennii arkhiv (filologichni nauki) – Southern Archive (philological sciences)*, 2022, vol. 90, pp. 68-76. doi: [10.32999/ksu2663-2691/2022-90-9](https://doi.org/10.32999/ksu2663-2691/2022-90-9). (Ukr.)
2. Kalnybolotska E.V. *Zabezpechennia informatsiinoï bezpeki Ukraïni v sotsial'nikh merezhakh v umovakh povno-masshtabnoï voennoï agresii Rosiis'koï Federatsii proti Ukraïni* [Ensuring information security of Ukraine in social networks in the conditions of full-scale military aggression of the Russian Federation against Ukraine]. Kyiv, 2022. 69 p. Available at: www.er.nau.edu.ua/handle/NAU/55680. (Ukr.)
3. *Rishennia Radi nats. bezpeki i oboroni Ukraïni vid 24.02.2022. Pro vvedennia v diiu planu oboroni Ukraïni ta Zvedenogo planu teritorial'noï obroni Ukraïni* (Decision of the National Council. of Security and Defense of Ukraine dated 24.02.2022. On the implementation of the Defense Plan of Ukraine and the Combined Plan of Territorial Defense of Ukraine) Available at: www.zakon.rada.gov.ua/laws/show/n0033525-22#Text (accessed 15 April 2022). (Ukr.)
4. Melnikova-Kurganova O.S. Sotsial'ni komunikatsii v blokadnomu Mariupoli: osoblivosti, ikh vidï, tipi komunikatoriv. *Materiali 11 Mizhn. nauk. konf. «Informatsiia, komunikatsiia, suspil'stvo»* [Social communications in the blockaded Mariupol: features, their types, types of communicators. Proceedings of 11-th Int. Sci. Conf. «Information, communication, society»]. Lviv, 2022, pp. 182-183. (Ukr.)
5. Voronko O.Y. Propaganda 2.0 [Propaganda 2.0]. *Sotsial'no-politichni studii : nauk. al'manakh – Social and political studies: sci. almanac*, 2020, no. 4, pp. 15-19. (Ukr.)
6. Kantur O.M. Aktual'ni problemi protidii informatsiinim zagrozam u sotsial'nikh media pid chas pov-nomasshtabnogo vtorgnennia Rosii v Ukraïnu [Current problems of countering informational threats in social media during the full-scale Russian invasion of Ukraine]. *Naukovi zapiski Institutu zakonodavstva Verkhovnoï Radi Ukraïni – Scientific Papers of the Legislation Institute of the Verkhovna Rada of Ukraine*, 2022, no. 2, pp. 102-110. doi: [10.32886/instzak.2022.02.11](https://doi.org/10.32886/instzak.2022.02.11). (Ukr.)
7. Cherpak T.V. Institutsiïni problemi informatsiinoï politiki na skhodi Ukraïni [Institutional problems of information policy in the east of Ukraine]. *Visnik Dnipropetrovs'kogo universitetu. Serii: Filozofii. Sotsiologii. Politologii – Bulletin of Dnipropetrovsky university. Series: Philosophy. Sociology. Politology*, 2017, no. 1, pp. 86-95. (Ukr.)
8. *Ofitsiinii sait borot'bi proti voroga na it-fronti – IT ARMY of Ukraine* (The official website of the fight against the enemy on the IT front - IT ARMY of Ukraine) Available at: <https://itarmy.com.ua/> (accessed 10 April 2022). (Ukr.)
9. Iz kogo i chogo skladaet'sia IT-armiia Ukraïni? Zvit Tsentru doslidzhennia bezpeki u Tsiurikhu (Who and what does the IT army of Ukraine consist of? Report of the Security Research Center in Zurich) Available at: <https://dev.ua/news/it-armiya-ukrainy-1656515927> (accessed 10 May 2022). (Ukr.)
10. Канал «StopRussia | MRIYA» (Channel «StopRussia | MRIYA») Available at: <https://mriya.social/projects/channel/> (accessed 15 May 2022). (Ukr.)

Рецензент: О.І. Проніна
канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 20.05.2021

136 МЕТАЛУРГІЯ

УДК 621.74

doi: 10.32782/2225-6733.44.2022.2

© Дан Л.О.¹, Трофімова Л.О.²**АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ЛИТИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ З МАТРИЦЕЮ З ЛЕГКИХ СПЛАВІВ**

В статті розглянуті та проаналізовані основні складові технології виготовлення литих композиційних матеріалів на основі легких сплавів – алюмінію та магнію. Особлива увага приділена вибору: матричного сплаву, типу, розмірів та кількості армуючих часток, а також термочасових і кінетичних параметрів процесу.

Ключові слова: алюміній, магній, сплав, композиційний матеріал, матриця, частки, що армують.

L.O. Dan, L.O. Trofimova. Analysis of technological parameters of cast composite materials with a matrix of light alloys manufacture. The successful functioning and further development of most modern industries, such as aerospace, transport, military, biomedicine, is not possible without the use of lightweight, durable and inexpensive materials to manufacture. Light alloys are widely used in industry and everyday life due to the high complex of physical and mechanical properties, wear and corrosion resistance as well as low cost. In this regard, the use of light alloys as a basis for composite materials is justified and expedient. The properties of the finished composite material exceed the properties of its constituent components. The potential of these materials has not been fully used to this day despite the growing interest in metal matrix composites and extensive investigations aimed at the development of production technology and the introduction of advanced systems based on light matrices. The article presents a brief review of the literature on the analysis of the main components of the technology of cast composite materials (CCM) based on light alloys of aluminum and magnesium reinforced by particles of different types. Particular attention is paid to the choice of the matrix alloy, the type, size and amount of reinforcing particles introduced into it, as well as the thermal-time and kinetic parameters of the process. The matrix alloy must be uniform, strong, light and inexpensive. The particles must have a high hardness and be optimally distributed in the matrix, to be securely fixed in it. An important element of the technology of manufacturing CCM by liquid-phase method is also a method of introducing solid particles of liquid metal. Several ways of introducing reinforcing particles into the melt were analysed too. Only the optimal combination of all these elements can provide composite materials with a high level of physical, mechanical and operational properties. In addition, the article suggests directions for further research in this area.

Key words: aluminium, magnesium, alloy, composite material, matrix, reinforcing particles.

Постановка проблеми. Успішне функціонування та подальший розвиток більшості сучасних галузей промисловості, таких як аерокосмічна, транспортна, військова, біомедицина, неможливе без застосування легких, міцних та недорогих у виробництві матеріалів. Сьогодні всім цим вимогам відповідають композиційні матеріали (КМ) на базі сплавів Al і Mg [1-3].

¹ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0001-9084-516X, danleonid.alex@gmail.com

² канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0003-4576-2589, trofimova.pstu@gmail.com

Прийнято вважати, що композиційні матеріали – це матеріали, що містять дві або більше фази (матрицю та армуючі частинки), які істотно відрізняються за властивостями і мають чітку межу розділу [4]. Властивості готового композиційного матеріалу перевищують властивості складових його компонентів. У КМ штучно об'єднані високопластичні металеві матриці, наприклад, сплави алюмінію, і високоміцні, високомодульні наповнювачі. При такому поєднанні фаз можна отримувати композити з необхідними значеннями міцності, модуля пружності, мікротвердості та тріщиностійкості, жароміцності, а також створювати матеріали з необхідними діелектричними, магнітними, радіопоглинаючими та іншими спеціальними характеристиками [5].

Як показує досвід, при отриманні композиційних матеріалів слід приділяти велику увагу підбору як матричного сплаву, так і армуючих його частинок. Матричний сплав має бути однорідним, міцним, легким та недорогим. Частинки повинні мати високу твердість і оптимально розподілятися в матриці, надійно бути зафіксованими в ній. Тільки в цьому випадку буде досягнуто позитивного технічного та економічного результату.

Мета статті – проаналізувати різні аспекти технології отримання литих композиційних матеріалів на основі легких (алюмінієвих і магнієвих) сплавів, а також їх вплив на властивості готового продукту.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Алюмоматричні та магнійматричні композити.

Алюміній, магній та сплави на їх основі, враховуючи високий комплекс фізико-механічних властивостей, зносостійкість, корозійну стійкість, невисоку вартість, широко застосовуються промисловості, у побуті. Разом з тим стає очевидним, що сьгоднішні вимоги, що пред'являються до деталей машин і механізмів, не можуть бути задоволені навіть усім різноманіттям відомих сплавів. Вихід може бути знайдений у площині створення композиційних матеріалів з використанням металевої матриці на алюмінієвій та магнієвій основі. Аналіз літературних джерел [4, 6] показує, що такі композиційні матеріали становлять основну масу вироблених нині литих КМ.

Затребуваність алюмо- і магнійматричних литих композиційних матеріалів підтверджується широким їх застосуванням у конструкціях відповідальних деталей військових та цивільних літаків. Наприклад, у конструкції підфюзеляжних гребенів винищувача F-16 (США) застосовується КМ 6092/SiC/17,5 (за номенклатурою ANSI). Композити на основі алюмінієвих сплавів виробництва The discontinuously Reinforced Aluminum Company (USA), зміцнені частинками карбиду кремнію 6092/SiC/17,5p DRA, 2009/SiC/15p-T4 DRA 93, 6063/SiC/5p, застосовують для виготовлення кришок люків, конструкційних елементів фюзеляжу, механічних та гідравлічних систем, панелей обшивки кабіни, корпусу електронних приладів. Високі характеристики КМ на основі алюмінію, дисперсно-армованого частинками, дозволяють виготовляти з цього матеріалу такі відповідальні деталі, як, наприклад, муфта лопати вентилятора гелікоптера [6]. Комерційне застосування алюмоматричних композиційних матеріалів у галузі автомобілебудування (двигун, гальмівні системи, трансмісія тощо) налічує вже більше 30 років [7].

Подібні матеріали також перспективні для використання в якості термобар'єрних покриттів лопаток газотурбінних двигунів, криогенних фланців та інших елементів високого тиску рідинних ракетних двигунів, полегшених трубопроводів в авіаційній та космічній техніці, корпусів електронної техніки, статичних та рухомих деталей електронної техніки [7].

Крім того, в даний час металоматричні алюмінієві композити використовуються як радіаційно-захисні матеріали. По-перше – це захист обладнання та техніки, що працюють в умовах радіаційного ураження. По-друге – біологічний захист персоналу, який обслуговує це обладнання та техніку на об'єктах використання атомної енергії, а також персоналу медичних та аварійно-рятувальних служб з підвищеними вимогами до біологічно-інертних та рентгенозахисних властивостей матеріалів. Проводиться розробка нового класу полегшених радіаційно-захисних матеріалів на основі алюмінієвих та магнієвих композитів з різними керамічними наповнювачами, залежно від типу іонізуючого випромінювання. Конструкційні металеві матеріали мають високі механічні властивості, але при експлуатації в режимі підвищеного іонізуючого випромінювання схильні до значного набухання, у тому числі за рахунок структурних змін.

Цим структурним змінам можна запобігти шляхом використання металів, мало схильних до набухання і модифікування різними наноструктурними наповнювачами [8].

Слід зазначити, що крім алюмо- та магній-матричних композитів відомі приклади створення композиційних матеріалів на основі сталі Гатфільда, нержавіючих сталей та чавунів [9].

Виклад основного матеріалу.

Методи одержання композиційних матеріалів.

Усі методи отримання композиційних матеріалів прийнято ділити на твердофазні та рідкофазні [4, 6 та ін.]. На відміну від твердофазних, рідкофазні методи більш технологічні та менш затратні. Це тому, що більшість рідкофазних методів пов'язані з отриманням КМ з урахуванням легкоплавких сплавів.

При реалізації рідкофазних методів матричний метал, що знаходиться в повністю або частково розплавленому стані, змішується з армуючим матеріалом, утворюючи новий за своїми властивостями композиційний матеріал. Крім інших переваг такий підхід до отримання КМ дозволяє ефективно керувати процесами, що протікають на межі твердої та рідкої фаз.

Властивості композиційного матеріалу, що утворюється, залежать від ряду факторів (Рис.). Розглянемо основні з них.

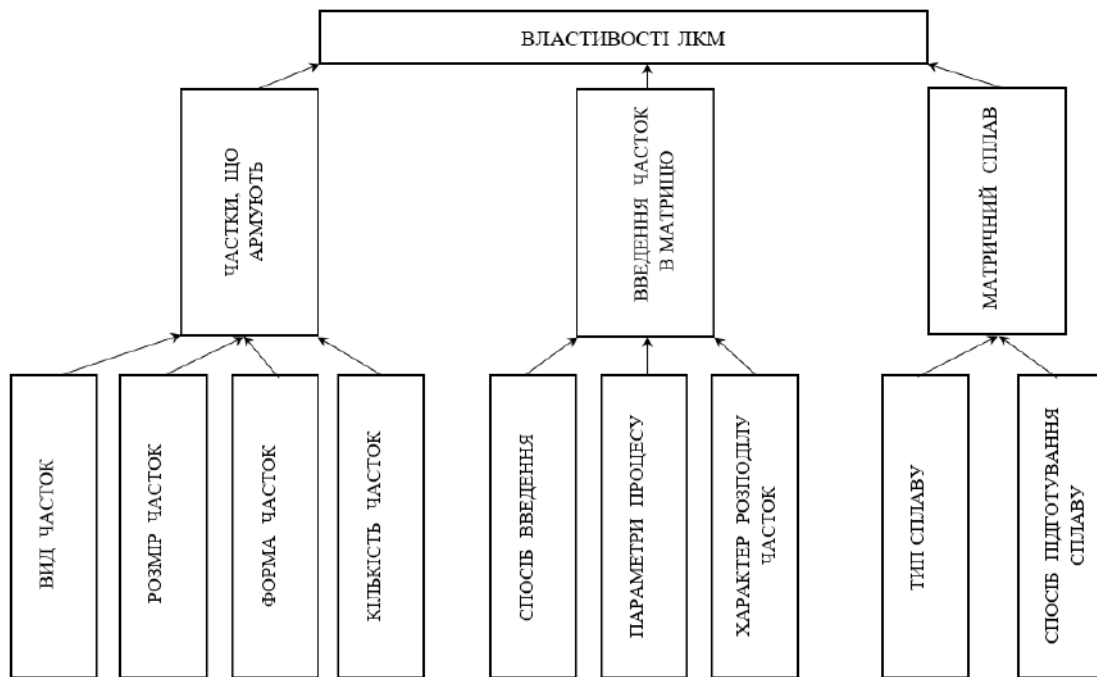


Рисунок – Параметри технології отримання литих композиційних матеріалів (ЛКМ), що визначають їх властивості

Частинки, що армують і взаємодія їх з рідким металом.

Крім вибору матричного сплаву в технології отримання литих КМ важливим є вибір армуючого матеріалу і способу введення армуючих частинок в розплав.

Залежно від природи і речовинного складу частинок, що вводяться, вони можуть сприяти підвищенню міцнісних, фрикційних або антифрикційних характеристик матричного сплаву. Властивості литих композицій, армованих твердими, нерозчинними, тугоплавкими частинками, значною мірою визначаються природою, розміром, об'ємною часткою і формою цих частинок та їх взаємодією з матрицею. Спільним для більшості методів одержання є армування матричних сплавів дисперсною фазою у вигляді частинок оксидів, нітридів, карбідів, боридів та тугоплавких металів. Як технологічно і економічно прийнятних армуючих елементів для виробів на основі матриць з алюмінієвих сплавів знаходять застосування дрібнодисперсні матеріали, отримані з техногенних відходів [10]. Використовуються, у тому числі, шлаки металургійних виробництв, ваграночної плавки, відходи збагачення, золи теплових агрегатів, шамотний по-

рошок, бій кераміки та ін., які розмелюють в порошок у кульових або вібраційних млинах і прожарюють у сушильних шафах або в камерах. Відомі випадки введення частинок графіту та/або бронзи у вигляді стружки для підвищення антифрикційних властивостей алюмінієвих сплавів [5, 11]. У сплави на основі Al і Mg досить часто вводять частки SiC, Al₂O₃, B₄C, литі волокна базальту та лусочки графіту, слюду [3, 12, 13].

Розмір часток може коливатися у межах: від 1 до 200-400 мкм [3, 4, 14, 15]. В останні роки досить велика кількість досліджень була присвячена армуванню металевих матриць наночастинками [7, 16, 17].

Наповнювачі у вигляді волокон або частинок можуть бути фазою, що зміцнює, тільки при високій міжфазній адгезії. Зазвичай, у комбінаціях, що використовуються, розплав - тверді частинки відзначається погане змочування. Поліпшення змочування рідким металом твердих частинок посилює їх зв'язок з матричним металом, тим самим підвищуються механічні та експлуатаційні характеристики готових виробів. Введення в рідкий метал поверхнево-активних елементів знижує поверхневий натяг на межі твердої та рідкої фаз. Підігрів, а іноді і прожарювання армуючих частинок перед введенням у рідкий матричний сплав, необхідний для видалення з їхньої поверхні вологи та інших адсорбованих поверхнею газів, а іноді створення окисних плівок. У кінцевому результаті позитивний ефект підігріву частинок позначається на поліпшенні їх змочуваності. Аналогічним чином впливає на поліпшення змочування підвищення температури розплаву в останній момент введення у нього дисперсних частинок.

Також, використовуючи замість окислювальної атмосфери інертний газ або вакуум у процесі отримання КМ, вдається отримувати чистий матричний метал, а отже, забезпечувати надійний контакт з армуючими частинками.

Кількість твердої фази, що вводиться в розплав при реалізації рідкофазних методів, зазвичай менше, ніж при реалізації твердофазних [6]. Кількість дисперсної фази, що забезпечує найбільший приріст рівня різних властивостей, залежить від природи матричного сплаву та твердих частинок, їх розміру та характеру розподілу в матриці. Так за введенні навіть 0,3-1,0 % ваг. WS₂ фракцією ~ 2 мкм відзначалося помітне підвищення межі міцності та межі плинності сплаву AZ91 [18]. Позитивний вплив на міцність при стисканні та розтягуванні автори [19] виявили вже при введенні 1% мас. частинок B₄C матрицю зі сплаву AZ91. У роботі [15] було знайдено, що для комбінації AZ91/SiCp при розмірі частинок 20-40 мкм оптимальна, з точки зору підвищення рівня властивостей міцності, кількість твердої фази 10-15 % мас. У роботі [4] значне підвищення зносостійкості металу AZ91 було відзначено при армуванні його 10% мас. частинками SiCp із середнім розміром зерна 10 мкм. За результатами дослідження [9] у високолеговані сталі рекомендовано вводити 5-50% об. твердих частинок у вигляді карбідів, нітридів титану, вольфраму і ніобію з метою підвищення зносостійкості литих деталей.

У роботах [20, 21] показано, що при високій об'ємній частці армуючих частинок композиційні матеріали з алюмінієвою матрицею показують високу контактну міцність, завдяки якій можуть бути створені опорні елементи вантажних рольгангів, підкладки дзеркал систем наведення, деталі гідроапаратів.

У літературі мало обговорюється вплив форми армуючих частинок на властивості литих КМ. Зазвичай частинки кераміки, карбіди, нітриди металів мають гострокутну, осколкову форму, частинки графіту – пластинчасту, а тугоплавких металів – округлу [2, 4, 9]. Вочевидь, що форма дисперсних частинок може бути чинником, що визначає фізико-механічні характеристики готових КМ. Аналогом при розгляді цього питання може бути форма графіту в чавуні [22]. Як відомо, включення пластинчастого графіту в сірому чавуні чинять дію, що надрізує металеву матрицю в протилежність включенням кулястого графіту високоміцного чавуну. Як наслідок, останній має набагато більш високий рівень механічних властивостей. Слід припустити, що включення округлих твердих частинок будуть більш сприятливі для властивостей литих КМ порівняно з гострокутними або осколковими.

Для повного розуміння ролі дисперсних частинок, що вводяться в рідкий матричний сплав, необхідно розглянути їх роль у кристалізаційних процесах.

Введення в алюмінієві розплави дисперсних тугоплавких наповнювачів сприяє зменшенню параметрів дендритної литої структури. Частинки кераміки, на думку авторів [23], не є центрами кристалізації, але вони відтісняються дендритами α – алюмінію в міждендритні прос-

тори, збагачені легкоплавкими фазами. При цьому модифікуюча роль частинок кераміки обумовлена обмеженням обсягів розплаву, в яких проходить ліквідація. Частинки металоподобних карбідів та інтерметалідів також надають модифікуючий вплив на литу структуру КМ, але вже як центри кристалізації. При додаванні до складу КМ частинок графіту останні розташовуються переважно в міждендритних просторах, а також можуть бути підкладкою для кристалів первинного кремнію в силумінах. Встановлено, що зі зростанням вмісту у КМ частинок кераміки та графіту подрібнення фрагментів структури посилюється.

Способи введення армуючих частинок у розплав та параметри процесу введення.

Наступним елементом технології виготовлення КМ рідкофазним методом є спосіб введення твердих частинок рідкого металу. Залежно від обраного способу, можна отримати кілька варіантів розподілу частинок матриці.

Перший варіант – рівномірний розподіл часток. Для забезпечення рівномірного диспергування армуючих частинок найбільш поширений спосіб замішування [2, 4, 16, 18, 24 та ін]. Основний принцип методу у тому, що армуючі частки вводяться у розплавлений матричний метал і рівномірно розподіляються у ньому за допомогою перемішування. Чим більш рівномірно розподілені тверді частинки в м'якій матриці, тим більш високий рівень властивостей у всьому обсязі набуває композит. Тому важливо правильно вибрати технологічні параметри процесу. До них відносяться швидкість перемішування, час перемішування, температура розплаву, температура підігріву частинок, що вводяться, і введення в розплав поверхнево-активних добавок.

Швидкість перемішування є виключно важливим параметром, що визначає ступінь турбулентності потоку рідкого металу, а, отже, і характер розподілу твердих частинок у розплаві. Як показано в роботах [2, 4, 24], рух армуючих частинок у розплавленому металі безпосередньо пов'язаний зі швидкістю його переміщення. При цьому чим вище швидкість перемішування, тим вище ступінь турбулентності потоку, тим менш помітні седиментаційні процеси, тим більш однорідно розподілені частинки в рідкому, а потім і в матричному сплаві, що затвердів. У цих роботах показано, що з підвищенням швидкості перемішування крім всього зменшується величина поверхневого натягу на межі твердої і рідкої фаз, що, як уже зазначалося, дуже важливо для забезпечення надійної фіксації частинок в матриці. На практиці для замішування армуючих частинок у рідкий метал використовують високошвидкісні механічні, з частотою обертання до 4000 і більше об./хв., та ультразвукові мішалки [25]. Вибір швидкості перемішування має базуватися на оцінці в'язкості розплаву. Цей параметр, як відомо, безпосередньо пов'язаний із складом рідкого металу та його температурою.

Час перемішування є критичним параметром процесу [26]. Недостатній час перемішування може призвести до нерівномірного розподілу твердих частинок у рідкому металі, їх концентрації в одних обсягах та відсутності в інших. Результатом надмірно тривалого перемішування може бути деформація та руйнування активного елемента мішалки за рахунок впливу високих температур, що поєднуються з механічними навантаженнями. Вочевидь, що в разі кожного конкретного випадку необхідно емпіричним шляхом знаходити оптимальний час перемішування.

Вибір температури процесу є також важливим елементом технології виготовлення виливків із КМ [27]. Крім забезпечення необхідної в'язкості розплаву в момент введення та замішування в ньому армуючих частинок функцією температури є рідкоплинність. Загально визнана роль рідкоплинності у наповненні ливарних форм і отриманні правильної конфігурації виливків. Підвищення температури розплаву також поліпшує змочуваність розплавом дисперсних частинок.

Дещо інший підхід до забезпечення рівномірного розподілу армуючих частинок реалізований при литті за моделями, що газифікуються. Тверді частинки змішуються з гранулами підспіненого полістиролу і інжектуються до прес-форми [28, 29]. Їх рівномірний розподіл у моделі зберігається і в готовому виливку. Даний метод поки не знайшов широкого застосування на практиці через погану керованість процесом.

Другий варіант відповідає отриманню функціонально-градієнтних матеріалів (ФГМ). В цьому випадку необхідні параметри фізичних властивостей та експлуатаційних характеристик (коефіцієнтів тертя, термічного розширення, зносостійкості, модуля пружності та ін.) реалізу-

ються в окремих заданих областях виробу. Частинки, що армують, тим чи іншим способом концентрують у найбільш навантаженій ділянці виливка, тим самим підвищуючи її працездатність. Способів такої концентрації кілька. Виготовлення композитів методом відцентрового лиття дає можливість отримувати заготовки з диференційованим розподілом армуючих елементів за перетином виливка [30]. Отримані деталі мають армовану зовнішню або внутрішню поверхню (зону), залежно від співвідношення щільності частинок і матричного сплаву [5, 30-32]. Одним з найважливіших технологічних факторів при відцентровому литті, що впливає на сегрегаційні процеси, є гравітаційний коефіцієнт K , що показує, у скільки разів обтяжуються всі компоненти сплаву в полі дії відцентрових сил.

При литті в стаціонарні форми за рахунок різниці в питомій вазі матричного металу та армуючих частинок, можна сконцентрувати їх або у верхній, або в нижній частині виливка, надавши цим йому необхідні властивості, що відрізняються від властивостей основного металу.

Ще одна група методів введення армуючих частинок у матричний сплав заснована на технології запропонованої Т. Нукамі та М. Флемінгсом [33]. Ця технологія (за кордоном звана технологія *in-situ*), заснована на синтезі другої фази внаслідок хімічної взаємодії введених у розплав компонентів. Вона характеризується цілою низкою переваг: просте та порівняно недороге обладнання, короткий технологічний цикл, висока чистота та якість кінцевих сплавів. Найбільшого поширення знайшов варіант технології, що полягає у підготовці лігатури, яка складається з ультрадисперсних порошків титану, вуглецю та алюмінієвого наповнювача у вигляді пілет і введення цієї лігатури в розплав алюмінію [34, 35 та ін.]. В результаті протікання ланцюжка хімічних реакцій у місці введення лігатури утворюється TiC , що виступає в ролі армуючої фази.

Після введення армуючих частинок розплавлена металева матриця твердне, надійно фіксує армуючі частинки всередині себе. При цьому, залежно від призначення композиційного матеріалу, можливе формування фасонного виливку чи зливку.

Висновки

Литі композиційні матеріали на основі алюмінію, магнію та сплавів на їх основі забезпечують рівень властивостей, що набагато перевищує такий у базових металів та сплавів. Це робить ЛКМ перспективними матеріалами для багатьох галузей техніки.

При отриманні ЛКМ важливими є елементи технології: вибір типу матричного сплаву, способу його підготовки; типу, розмірів, форми та кількості армуючих частинок; принципу та параметрів введення дисперсних частинок у розплав. Тільки оптимальне поєднання всіх цих елементів дозволяє забезпечити високий рівень фізичних, механічних і експлуатаційних властивостей ЛКМ.

Перелік використаних джерел:

1. Rohatgi P. Cast aluminum-matrix composites for automotive applications / P. Rohatgi // JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society. – 1991 – № 43(4). – Pp. 10-15. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/BF03220538>.
2. A study of fabrication methods of aluminium based composites focused on stir casting process / A.K. Sharma, R. Bhandari, A. Aherwar, C. Pinca-Bretotean // Materials Today: Proceedings. – 2020. – № 27. – Pp. 1608-1612. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.316>.
3. Determination of substrate log-normal distribution in the AZ91/SiCp composite / J. Lelito, P.L. Žak, B. Gracz, M. Szucki, D. Kalisz, P. Malinowski, J.S. Suchy, W.K. Krajewski // Metalurgija. – 2015. – № 54(1). – Pp. 204-206.
4. Study of the microstructure and mechanical characteristics of AZ91–SiCp composites fabricated by stir casting / B. Saleh, J. Jiang, R. Fathi, Q. Xu, L. Wang, A. Ma // Archives of Civil and Mechanical Engineering. – 2020. – Vol. 20, № 3. – Pp. 102-115. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s43452-020-00071-9>.
5. Чернышова Т.А. Дискретно армированные композиционные материалы с матрицами из алюминиевых сплавов и их трибологические свойства / Т.А. Чернышова, Л.И. Кобелева, Л.К. Болотова // Металлы. – 2001. – № 6. – С. 85-98.
6. Мэтьюз Ф. Композитные материалы. Механика и технология / Ф. Мэтьюз, Р. Ролингс. –

- М. : Техносфера, 2004. – 408 с.
7. Кондратенко А.Н. Перспективные технологии получения и области применения наноструктурных металломатричных композитов / А.Н. Кондратенко, Т.А. Голубкова // Конструкции из композиционных материалов. – 2009. – № 1. – С. 24-25.
 8. Гульбин В.Н. Облегченные радиационно-защитные композиты / В.Н. Гульбин, Н.С. Колпаков // Наукоемкие технологии. – 2014. – Т. 15, № 3. – С. 4-16.
 9. Patent CA2934084A1 Canada, C22C38/58. Composite Metal Product / X. Tang, K.F. Dolman. – Filed 30.12.2014; publ. 09/07/2015.
 10. High strain rate compressive characterization of aluminum alloy/fly ash cenosphere composites / D.D. Luong, N. Gupta, A. Daoud, P.K. Rohatgi // JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society. – 2011. – № 63(2). – Pp. 53-56. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s11837-011-0029-y>.
 11. Effect of graphite particles on improving tribological properties Al-16Si-5Ni-5Graphite self-lubricating composite under fully flooded and starved lubrication conditions for transportation applications / E. Omrani, A.D. Moghadam, M. Algazzar, P.L. Menezes, P.K. Rohatgi // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2016. – № 87(1). – Pp. 929-939. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8531-6>.
 12. Печников А.А. Литые композиционные изделия с алюминиевой матрицей / А.А. Печников, А. Толешулы, Е.Г. Мещеряков // Известия МГТУ «МАМИ». – 2014. – № 1(19), том 2. – С. 42-44.
 13. Deonath. Damping capacity, resistivity, thermal expansion and machinability of aluminium alloy-mica composites / Deonath, R. Narayan, P.K. Rohatgi // Journal of Materials Science. – 1981. – № 16. – Pp. 3025-3032. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/BF00540308>.
 14. Baradeswaran A. Influence of B4C on the tribological and mechanical properties of Al 7075-B4C composites / A. Baradeswaran, A.E. Perumal // Composites Part B: Engineering. – 2013. – № 54. – Pp. 146-152. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.05.012>.
 15. Bhushan R.K. Fabrication and characterization of 7075 Al alloy reinforced with SiC particulates / R.K. Bhushan, S. Kumar, S. Das // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2015. – № 65(5-8). – Pp. 611-624. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4200-6>.
 16. Tensile properties of reactive stir-mixed and squeeze cast Al/CuO-based metal matrix nanocomposites / J.B. Ferguson, I. Aguirre, H. Lopez, B.F. Schultz, K. Cho, P.K. Rohatgi // Materials Science and Engineering. – 2014. – № 611. – Pp. 326-332. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.06.008>.
 17. Tribological Behavior of Aluminum Micro-and Nano-Composites / P.R. Rohatgi, P.L. Menezes, T. Lovell, M.R. Lovell // International Journal of Aerospace Innovations. – 2011. – № 3(3). – Pp. 153-162. – Mode of access: <https://doi.org/10.1260/1757-2258.3.3.153>.
 18. Huang S. Effects of tungsten disulfide on microstructure and mechanical properties of AZ91 magnesium alloy manufactured by stir casting / S. Huang, A. Abbas // Journal of Alloys and Compounds. – 2020. – № 817. – Pp. 153-321. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153321>.
 19. Mohammadi H. The statistical analysis of tensile and compression properties of the as-cast AZ91-X%B4C composites / H. Mohammadi, M. Emamy, Z. Hamnabard // International Journal of Metalcasting. – 2019. – № 14(2). – Pp. 505-517. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s40962-019-00377-2>.
 20. Композиционные материалы с матрицей из алюминиевых сплавов, упрочненных частицами, для пар трения скольжения / Т.А. Чернышева, Ю.А. Курганова, Л.И. Кобелева, Л.К. Болотова, И.Е. Калашников, И.В. Катин, А.В. Панфилов, А.А. Панфилов // Покрытия и материалы специального назначения. – 2007. – № 3. – С. 38-49.
 21. Васильев В.В. Композиционные материалы. Справочник / В.В. Васильев. – М. : Машиностроение, 1990. – 512 с.
 22. Dejack M. Literature Review of CGI and Ductile Iron and Development of Improved Models for HCF / M. Dejack // Conference: International FEMFAT User Meeting. – 2015. – Pp. 1-48.
 23. Печников А.А. Влияние армирования на структуру, механические и технологические свой-

- ства КМ / А.А. Печников, А. Толешулы, Е.Г. Мещеряков // Известия МГТУ «МАМИ». – 2014. – Т. 2, № 1(19). – С. 44-48.
24. Kumar A. Recent progress in production of metal matrix composites by stir casting process / A. Kumar, C. Singh, R. Chaudhary // *Materials Today: Proceedings*. – 2020. – № 21, part 3. – Pp. 1453-1457. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.10.079>.
 25. Singh J. A review of microstructure, mechanical properties and wear behavior of hybrid aluminium matrix composites fabricated via stir casting route / J. Singh, A. Chauhan // *Sādhanā*. – 2019. – № 44. – Pp. 1-16. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s12046-018-1025-5>.
 26. Miracle D.B. Metal matrix composites – from science to technological significance / D.B. Miracle // *Composites science and technology*. – 2005. – № 65. – Pp. 526-540. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.05.027>.
 27. Stir casting process for manufacture of Al-SiC composites / S. Soltani, R.A. Khosroshahi, R.T. Mousavian, Z.Y. Jiang, A.F. Boostani, D. Brabazon // *Rare Metals*. – 2017. – № 36(7). – Pp. 581-590. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s12598-015-0565-7>.
 28. Небожак И.А. Влияние армирования дисперсным интерметаллидом FeCr, имплантированным в газифицируемую модель, на структуру и механические свойства сплава АК12 / И.А. Небожак // *Литье. Металлургия-2016: материалы XII Межд. научн.-практ. конф. (24-26 мая 2016 г.; г. Запорожье)*. – Запорожье. – 2016. – С. 176-178.
 29. Пат. 244 Україна, МКІЗ В22С7/02, В22С3/00. Спосіб виготовлення моделей із пінополістиролу / О.Й. Шинський, Л.П. Вишнякова, В.Н. Плотнікова, Є.Ф. Князев; Інститут проблем лиття НАН України. – № 3493216/22-02; заявл. 15.01.1993; опубл. 30.04.1993, Бюл. № 1; Приоритет 27.09.1982, № 1079340 А1 (СРСР). – 1 с.
 30. Гусев С.С. Использование методов центробежного литья для получения изделий из композиционных материалов с упрочненной поверхностью / С.С. Гусев, Д.Н. Лобков, С.С. Казачков // *Материаловедение*. – 1999. – № 5. – С. 50-53.
 31. Алексеева Ю.С. Применение метода центробежного литья для изготовления втулок из градиентных композиционных материалов / Ю.С. Алексеева // *Вестник ФГОУ МГАУ*. – 2008. – № 4. – С. 96-99.
 32. Kevorkijan V. Functionally graded aluminium matrix composites / V. Kevorkijan // *American Ceramic Society Bulletin*. – 2003. – Vol. 82. – Pp. 2.
 33. Nukami T. In situ synthesis of TiC particles-reinforced aluminum matrix composite / T. Nukami, M.C. Flemings // *Metallurgical and Materials Transactions*. – 1995. – № 26A. – Pp. 1877-1884. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/BF02670775>.
 34. Locally reinforcement TiC-Fe type produced in situ in castings / E. Olejnik, T. Tokarski, B. Grabowska, Ł. Szymański, P. Kurtyka, W. Maziarz, P. Czapla // *Archives Of Foundry Engineering*. – 2016. – Vol. 16(3). – Pp. 77-82. – Mode of access: <https://doi.org/10.1515/afe-2016-0054>.
 35. Maziarz W. Microstructure and Mechanical Properties of In Situ Cast Aluminum Based Composites Reinforced with TiC Nano-Particles / W. Maziarz, P. Bobrowski, A. Wójcik // *Materials Science Forum*. – 2020. – Vol. 985. – Pp. 211-217. – Mode of access: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.985.211>.

References:

1. Rohatgi P. Cast aluminum-matrix composites for automotive applications. *JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, 1991, № 43(4), pp. 10-15. doi: 10.1007/BF03220538.
2. Sharma A.K., Bhandari R., Aherwar A., Pinca-Bretotean C. A study of fabrication methods of aluminium based composites focused on stir casting process. *Materials Today: Proceedings*, 2020, № 27, pp. 1608-1612. doi: 10.1016/j.matpr.2020.03.316.
3. Lelito J., Żak P.L., Gracz B., Szucki M., Kalisz D., Malinowski P., Suchy J.S., Krajewski W.K. Determination of substrate log-normal distribution in the AZ91/SiCp composite. *Metalurgija*, 2015, № 54(1), pp. 204-206.
4. Saleh B., Jiang J., Fathi R., Xu Q., Wang L., Ma A. Study of the microstructure and mechanical characteristics of AZ91-SiCp composites fabricated by stir casting. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2020, vol. 20, № 3, pp. 102-115. doi: 10.1007/s43452-020-00071-9.
5. Chernyshova T.A., Kobeleva L.I., Bolotova L.K. Diskretno armirovannye kompozicionnye

- materialy s matricami iz aljuminievyh splavov i ih tribologicheskie svoystva [Discretely reinforced composite materials with aluminum alloy matrices and their tribological properties]. *Metally – Metals*, 2001, № 6, pp. 85-98. (Rus.)
6. Mjet'juz F., Rolings R. *Kompozitnye materialy. Mehanika i tehnologija* [Composite materials. Mechanics and technology]. Moscow, Tehnosfera Publ., 2004. 408 p. (Rus.)
 7. Kondratenko A.N., Golubkova T.A. Perspektivnye tehnologii poluchenija i oblasti primenenija nanostrukturnyh metallomatrichnyh kompozitov [Promising Technologies for Obtaining and Fields of Application of Nanostructured Metal Matrix Composites]. *Konstrukcii iz kompozicionnyh materialov – Composite structures*, 2009, № 1, pp. 24-25. (Rus.)
 8. Gul'bin V.N., Kolpakov N.S. Oblegchennye radiacionno-zashhitnye kompozity [Lightweight radiation-protective composites]. *Naukoemkie tehnologii – High technologies*, 2014, vol. 15, № 3, pp. 4-16. (Rus.)
 9. Tang X., Dolman K.F. Composite Metal Product. Patent Canada, no. CA2934084A1, 2015.
 10. Luong D.D., Gupta N., Daoud A., Rohatgi P.K. High strain rate compressive characterization of aluminum alloy/fly ash cenosphere composites. *JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, 2011, № 63(2), pp. 53-56. doi: **10.1007/s11837-011-0029-y**.
 11. Omrani E., Moghadam A.D., Algazzar M., Menezes P.L., Rohatgi P.K. Effect of graphite particles on improving tribological properties Al-16Si-5Ni-5Graphite self-lubricating composite under fully flooded and starved lubrication conditions for transportation applications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, № 87(1), pp. 929-939. doi: **10.1007/s00170-016-8531-6**.
 12. Pechnikov A.A., Toleshuly A., Meshherjakov E.G. Litye kompozicionnye izdelija s aljuminievoj matricej [Cast composite products with aluminum matrix]. *Izvestiya MGTU «MAMI»*, 2014, № 1(19), vol. 2, pp. 42-44.
 13. Deonath, Narayan R., Rohatgi P.K. Damping capacity, resistivity, thermal expansion and machinability of aluminium alloy-mica composites. *Journal of Materials Science*, 1981, № 16, pp. 3025-3032. doi: **10.1007/BF00540308**.
 14. Baradeswaran A., Perumal A.E. Influence of B4C on the tribological and mechanical properties of Al 7075-B4C composites. *Composites Part B: Engineering*, 2013, № 54, pp. 146-152. doi: **10.1016/j.compositesb.2013.05.012**.
 15. Bhushan R.K., Kumar S., Das S. Fabrication and characterization of 7075 Al alloy reinforced with SiC particulates. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, № 65(5-8), pp. 611-624. doi: **10.1007/s00170-012-4200-6**.
 16. Ferguson J.B., Aguirre I., Lopez H., Schultz B.F., Cho K., Rohatgi P.K. Tensile properties of reactive stir-mixed and squeeze cast Al/CuO-based metal matrix nanocomposites. *Materials Science and Engineering*, 2014, № 611, pp. 326-332. doi: **10.1016/j.msea.2014.06.008**.
 17. Rohatgi P.R., Menezes P.L., Lovell T., Lovell M.R. Tribological Behavior of Aluminum Micro- and Nano-Composites. *International Journal of Aerospace Innovations*, 2011, № 3(3), pp. 153-162. doi: **10.1260/1757-2258.3.3.153**.
 18. Huang S., Abbas A. Effects of tungsten disulfide on microstructure and mechanical properties of AZ91 magnesium alloy manufactured by stir casting. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, № 817, pp. 153-321. doi: **10.1016/j.jallcom.2019.153321**.
 19. Mohammadi H., Emamy M., Hamnabard Z. The statistical analysis of tensile and compression properties of the as-cast AZ91-X%B4C composites. *International Journal of Metalcasting*, 2019, № 14(2), pp. 505-517. doi: **10.1007/s40962-019-00377-2**.
 20. Chernysheva T.A., Kurganova Ju.A., Kobeleva L.I., Bolotova L.K., Kalashnikov I.E., Katin I.V., Panfilov A.V., Panfilov A.A. Kompozicionnye materialy s matricej iz aljuminievyh splavov, uprochnennyh chasticami, dlja par trenija skol'zhenija [Composite materials with a matrix of aluminum alloys hardened by particles for sliding friction pairs]. *Pokrytija i materialy special'nogo naznachenija – Coatings and materials for special purposes*, 2007, № 3, pp. 38-49. (Rus.)
 21. Vasil'ev V.V. *Kompozitsionnye materialy. Spravochnik* [Composite materials. Handbook]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 512 p. (Rus.)
 22. Dejack M. Literature Review of CGI and Ductile Iron and Development of Improved Models for HCF. *Conference: International FEMFAT User Meeting*, 2015, pp. 1-48.

23. Pechnikov A.A., Toleshuly A., Meshcheriakov E.G. Vliianie armirovaniia na strukturu, mekhanicheskie i tekhnologicheskie svoistva KM [Influence of reinforcement on the structure, mechanical and technological properties of CM]. *Izvestiya MGTU «MAMI»*, 2014, vol. 2, № 1(19), pp. 44-48.
24. Kumar A., Singh C., Chaudhary R. Recent progress in production of metal matrix composites by stir casting process. *Materials Today: Proceedings*, 2020, № 21, part 3, pp. 1453-1457. **doi: 10.1016/j.matpr.2019.10.079.**
25. Singh J., Chauhan A. A review of microstructure, mechanical properties and wear behavior of hybrid aluminium matrix composites fabricated via stir casting route. *Sādhanā*, 2019, № 44, Pp. 1-16. **doi: 10.1007/s12046-018-1025-5.**
26. Miracle D.B. Metal matrix composites – from science to technological significance. *Composites science and technology*, 2005, № 65, pp. 526-540. **doi: 10.1016/j.compscitech.2005.05.027.**
27. Soltani S., Khosroshahi R.A., Mousavian R.T., Jiang Z.Y., Boostani A.F., Brabazon D. Rare Metals Stir casting process for manufacture of Al-SiC composites. *Rare Metals*, 2017, № 36(7), pp. 581-590. **doi: 10.1007/s12598-015-0565-7.**
28. Nebozhak I.A. Vliianie armirovaniia dispersnym intermetallidom FeCr, implantirovannym v gazi-fitsiruemuuiu model', na strukturu i mekhanicheskie svoistva splava AK12. *Materialy XII Mezhd. nauchn.-prakt. konf. «Lit'e. Metallurgiiia-2016»* [Effect of Reinforcement with Dispersed FeCr Intermetallic Implanted in a Gasified Model on the Structure and Mechanical Properties of AK12 Alloy. Proceedings of XII Int. Sci.-Pract. Conf «Casting. Metallurgy-2016»]. Zaporozhye, 2016, pp. 176-178. (Rus.)
29. Shins'kii O.I., Vishniakova L.P., Plotnikova V.N., Kniazev S.F. *Sposib виготовлення моделі із пінопілістиролу* [A method of making models from expanded polystyrene]. Patent UA, no. 24, 1993. (Ukr.)
30. Gusev S.S., Lobkov D.N., Kazachkov S.S. Ispol'zovanie metodov tsentrobezhnogo lit'ia dlia polucheniia izdelii iz kompozitsionnykh materialov s uprochnennoi poverkhnost'iu [The use of centrifugal casting methods for obtaining products from composite materials with a hardened surface]. *Materialovedenie – Materials Science*, 1999, № 5, pp. 50-53. (Rus.)
31. Alekseeva Iu.S. Primenenie metoda tsentrobezhnogo lit'ia dlia izgotovleniia vtulok iz gradientnykh kompozitsionnykh materialov [Application of the centrifugal casting method for the manufacture of bushings from graded composite materials]. *Vestnik FGOU MGAU – Bulletin of FGOU MGAU*, 2008, № 4, pp. 96-99. (Rus.)
32. Kevorkijan V. Functionally graded aluminium matrix composites. *American Ceramic Society Bulletin*, 2003, vol. 82, pp. 2.
33. Nukami T., Flemings M.C. In situ synthesis of TiC particles-reinforced aluminum matrix composite. *Metallurgical and Materials Transactions*, 1995, № 26A, pp. 1877-1884. **doi: 10.1007/BF02670775.**
34. Olejnik E., Tokarski T., Grabowska B., Szymański Ł., Kurtyka P., Maziarz W., Czapla P. Locally reinforcement TiC-Fe type produced in situ in castings. *Archives Of Foundry Engineering*, 2016, vol. 16(3), pp. 77-82. **doi: 10.1515/afe-2016-0054.**
35. Maziarz W., Bobrowski P., Wójcik A. Microstructure and Mechanical Properties of In Situ Cast Aluminum Based Composites Reinforced with TiC Nano-Particles. *Materials Science Forum*, 2020, vol. 985, pp. 211-217. **doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.985.211.**

Рецензент: В.Б. Семакова
канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 21.04.2022

© Кривенко В.В.¹, Чупринов Є.В.², Олійник Т.А.³, Харітонов В.М.⁴,
Реков Ю.В.⁵

**ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПРОБИ
ЕФІОПСЬКОЇ ЗАЛІЗНОЇ РУДИ АРАВІЙСЬКО-НУБІЙСЬКОГО ЩИТА.
ЧАСТИНА 1. ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЧОВИННОГО СКЛАДУ ПРОБИ РУДИ**

Виконано ситовий аналіз матеріалу вихідної проби залізної руди із аравійсько-нубійського щита, що надійшов на дослідження. Проведений хімічний аналіз різних проб на вміст загального заліза та кремнію показав рівномірний розподіл компонентів по класам. Виконаний первинний огляд уламків +5 мм, котрий показав, що вони складаються, в основному, з двох компонентів – відокремлення кварцу і цементу, що їх зв'язує. За результатами аналізу виділено чотири типи уламків за вмістом цементу, котрий представлений сурико-охристо-глинистим цементом: мало-глиниста зі вмістом 5-10% цементу, середньо-глиниста зі вмістом 10-50% цементу, глиниста зі вмістом більше 50% цементу і убого-глиниста. Проведена рудорозборка матеріалу із виділенням п'яти мінералого-петрологічних різновидів.

Ключові слова: залізна руда, аравійсько-нубійський щит, рудорозборка, мінералогія, вміст заліза.

V.V. Krivenko, E.V. Chuprinov, T.A. Oliinyk, V.M. Haritonov, Y.V. Rekov. Study of technological properties of the sample ethiopian iron ore of the arabian-nubian shield. Part I. Study of the substance composition of the ore sample. A literary analysis of the presented studies of the Arabian-Nubian shield, its history of formation and geological features was performed. It was found that the iron ores of Ethiopia have a certain technological value, but the technological expediency of their enrichment should be confirmed by relevant studies. A sample of iron ore from an Ethiopian deposit was received and prepared for research. Preparation and work with the samples took place in accordance with the state standards of Ukraine. A sieve analysis of the material of the original sample of iron ore from the Arabian-Nubian shield, which was received for research, was performed. It was found that the genetically studied raw material is a product of chemical weathering of the original volcanic-sedimentary rock. The structure of the rock is fine-grained, oolitic, sometimes hornblende, porphyry, rarely psammitic and psephytic. The texture is powdery, mottled, in some places conglomerate-like, breccia-like, hollow, interspersed, almond-like. The chemical analysis of various samples for the content of total iron and silicon showed an even distribution of components by class. An initial examination of +5 mm fragments was performed, which showed that they consist mainly of two components - the separation of quartz and the cement that binds them. Based on the results of the analysis, four types of fragments were distinguished by the content of cement, which is represented by suric-ochre-clay cement: low-clay with a content of 5-10% cement, medium-clay with a content of 10-50% cement, clay with a content of more than 50% of cement and poor clay. The ore separation of the material was carried out, with the selection of five mineralogy-petrological varieties. The mineral composition is mainly represented by dispersed hematite, hydrohematite and quartz. There is also goethite, hy-

¹ канд. техн. наук, доцент, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0001-7822-6358, yvkrivenko2017@gmail.com

² канд. техн. наук, доцент, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0001-8605-3434, itchupa@gmail.com

³ д-р техн. наук, професор, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0002-0315-7308

⁴ канд. техн. наук, доцент, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг

⁵ канд. техн. наук, доцент, Технічний університет «Метінвест Політехніка», м. Запоріжжя

drogoethite, kaolinite and calcite. A single phenocryst of chalcopyrite was noted. The conclusions reached regarding the mineralogical and petrographic composition of the presented ore provide a basis for further electron-microscopic studies and analysis of the ore for the possibility of its enrichment.

Key words: iron ore, Arabian-Nubian shield, ore mining, mineralogy, iron content.

Постановка проблеми. На сьогоднішній день українська металургія переживає дуже складні часи. Проведення досліджень та розробка нових технологічних рішень надзвичайно ускладнені, а науковий потенціал не може себе реалізувати в повній мірі. В таких умовах можливим рішенням для продовження та розвитку науки буде залучення українських науковців до роботи над проектами за межами України. Прикладом такої роботи є представлене дослідження. Крім того, масштабного промислового видобутку, збагачення та перероблення залізних руд Ефіопії сьогодні не відбувається, тому дослідження відповідних проб може стати відповідним технологічним фундаментом для майбутніх робіт.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На протязі останніх 30 років Ефіопія була доволі політично нестабільною державою, тому проведення комплексних досліджень щодо залізних руд цієї країни було дуже ускладнено. Крім того, в літературі є дуже незначна кількість авторитетних джерел, роботи котрих були б присвячені родовищам залізних руд Ефіопії. Тим не менше, в роботі [1] детально проаналізовані родовища корисних копалин Ефіопії та надана характеристика родовищ залізних руд. Останній комплексний аналіз металургійної промисловості Ефіопії [2] відмічає її кризовий стан, що з малою ймовірністю вдасться подолати власними силами, тож долучення іноземних спеціалістів є найбільш оптимальним шляхом. В роботі [3] проведено аналіз генезису аравійсько-нубійського щита, надана інформація щодо особливостей її формування, типів руд, що утворились та їх властивостей. Особливої уваги також заслуговують дослідження геолого-петрографічних вулканогенних хребтів, проведені у роботі [4]. Аналогічні експедиційні дослідження були представлені дослідженням [5], де вивчались руди тектонічних зв'язків Данакільської западини с Африканської рифтової системи та з рифтом Червоного моря, та були представлені зв'язки між тектонікою та магматологією основних петрологічних та ізотопних даних з різних вулканічних одиниць північної Данакільської западини. Детальний аналіз ефіопських залізних руд представлений в роботі [6], де виконаний огляд різних типів порід різного походження, з особливою увагою до офіолітових і концентрично-зональних комплексів аляскинського типу.

Мета статті – дослідити пробу залізної руди ефіопського родовища із аравійсько-нубійського щита, проаналізувати її структуру та мінералогічний склад.

Виклад основного матеріалу. На дослідження надійшла проба залізородної сировини, ймовірно, вулканогенно-осадового, вулканогенного генезису, що зазнала хімічного вивітряння. Загальний вигляд шматкового матеріалу вихідної проби крупністю +60,0+0,0 мм наведено на рис. 1.



а



б

Рис. 1 – Матеріал вихідної проби: а – загальний вид; б – окремі уламки

Гранулометричний, хімічний та мінералогічний аналізи проби залізорудної сировини виконувались відповідно до ДСТУ 3792-98 «Руди залізні та концентрати. Метод визначення мінералогічного типу». Відбір проб для хімічного аналізу виконувався відповідно до ДСТУ ISO 7764:2008 «Руди залізні. Готування попередньо висушених випробних проб для хімічного аналізу». Хімічний та мінералогічний аналіз матеріалу проб супроводжувався мікрофотознімками та мікроскопічним вивченням матеріалу. Гранулометричний (ситовий) аналіз виконувався відповідно до ДСТУ 3210-95 «Руди залізні та марганцеві, концентрати, агломерати та окатиші. Визначення гранулометричного складу методом ситового аналізу».

Ситовий аналіз матеріалу вихідної проби наведено у таблиці 1. Розмір основної частини уламків (понад 87%) перевищує 20,0 мм. Хімічний аналіз на загальне залізо і оксид кремнію показав, що ці хімічні компоненти за класами крупності розподілені рівномірно. Масова частка $Fe_{заг}$ у пробі становила 36,47%, SiO_2 – 29,96%.

Первинний огляд уламків +5 мм досліджуваної сировини показав, що вони складаються, в основному, з двох компонентів – відокремлення кварцу (зерна, уламки – окатані і гострокутні) і цементу, що їх сполучає. Має місце два типи цементу: – сурико-охристо-глинистий (дисперсногематит-каолінітовий, гетит-гідрогетит-каолінітовий) блідо-рожевого, світло-жовтого або світло-сірого кольору та кремністо-суриковий (гетит-кварц-дисперсногемат; гетит-дисперсно-гематитовий) жовто-червоного, червоного кольору з бурим відтінком. Також було встановлено, що глинистий цемент має підлегле значення та зустрічається в уламках у різних кількостях. У зв'язку з цим було виділено чотири різновиди уламків:

- 1) мало-глинисті, що містять 5-10% сурико-охристо-глинистого цементу;
- 2) середньо-глинисті, що містять 10-50% сурико-охристо-глинистого цементу;
- 3) глинисті, що містять більше 50% сурико-охристо-глинистого цементу;
- 4) убого-глинисті, що містять до 5% сурико-охристо-глинистого цементу; також для цього різновиду характерним є більший розмір і кількість кварцових відокремлень порівняно з іншими різновидами.

Таблиця 1

Ситовий аналіз матеріалу вихідної проби залізорудної сировини

Клас крупності, мм	Вихід, %	Масова доля, %		Вилучення, %	
		$Fe_{заг}$	SiO_2	$Fe_{заг}$	SiO_2
+40,0	48,52	36,1	30,16	48,03	48,84
20,0-40,0	38,89	36,7	29,82	39,14	38,71
10,0-20,0	6,30	38,5	28,36	6,65	5,96
5,0-10,0	2,07	37,5	29,02	2,13	2,00
3,0-5,0	2,03	35,6	30,92	1,99	2,10
1,0-3,0	1,32	34	33,46	1,23	1,47
0,5-1,0	0,17	33,2	34,06	0,16	0,19
0,25-0,5	0,22	34	34,5	0,2	0,26
0,1-0,25	0,22	36,1	30,18	0,22	0,22
0,071-0,1	0,05	36,2	29,88	0,05	0,05
0-0,071	0,21	36,4	28,98	0,2	0,20
Всього	100,00	36,47	29,96	100,00	100,00

Різко-підлегле значення у матеріалі вихідної проби мають переважно кварцові уламки – фрагменти великих кварцових відокремлень. Вони були віднесені до п'ятого різновиду, їхньою відмінністю є незначна домішка (кілька десятих часток відсотка) дисперсного гематиту, частинки якого зосереджені частіше на поверхні кварцових уламків.

Подальше вивчення матеріалу проводилося методом рудорозборки із п'яти мінералогічних різновидів. На рудорозбірку було спрямовано чотири верхні класи: +40,0 мм; 20-40 мм; 10-20 мм; 5-10 мм. Результати показані в таблицях 2-5 та на рис. 2-5.

Таблиця 2

Мінералого-петрологічний склад матеріалу верхніх класів вихідної проби залізорудної сировини

Різновиди	Вихід різновидів (мас. %)			
	класи крупності, мм			
	+40,0	20-40	10-20	5-10
I – мало-глиниста	40,71	24,90	24,48	15,36
II – середньо-глиниста	14,53	13,69	13,91	13,35
III – глиниста	1,48	1,43	4,39	13,09
IV – убого-глиниста	43,28	44,65	52,87	46,37
V – уламки кварцу	0,00	15,33	4,35	11,83

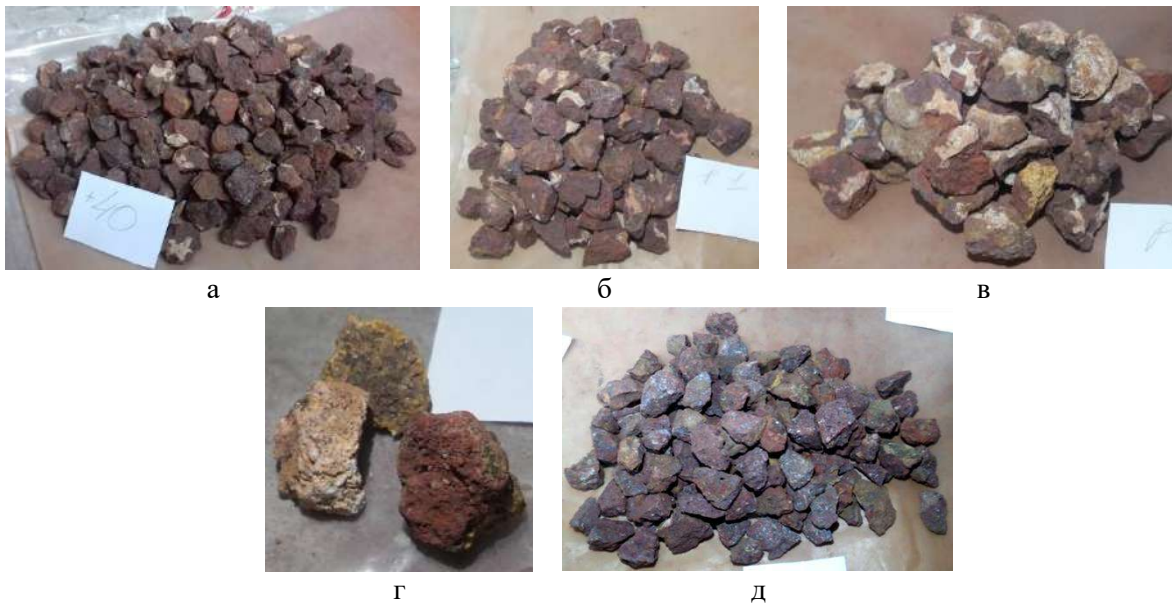


Рис. 2 – Матеріал класу крупності +40,0 мм: а – загальний вигляд; б-д – мінералого-петрологічні різновиди: б – мало-глинистий; в – середньо-глинистий; г – глинистий; д – убого-глинистий



Рис. 3 – Матеріал класу крупності 20-40 мм: а – загальний вигляд; б-д – мінералого-петрологічні різновиди: б – мало-глинистий; в – середньо-глинистий; г – глинистий; д – убого-глинистий, е – уламки кварцу

Таблиця 3

Мінеральний склад мінералого-петрологічних різновидів,
що складають матеріал верхніх класів вихідної проби залізорудної
сировини крупності 20-40 мм, визначений у світлі, що проходить

Індекс проб	Мінерали					Сума
	диспергований гематит + гідрогематит	гетит + гідрогетит	глинистий мінерал	кварц	кальцит	
мало-глиниста						
1_1	69,7	3,1	6,5	20,7	н.в.	100,0
1_2	66,3	5,5	5,7	22,5	н.в.	100,0
середнє	68,0	4,3	6,1	21,6	н.в.	100,0
середньо-глиниста						
2_1	37,7	3,5	37,1	21,7	н.в.	100,0
2_2	32,8	7,3	35,6	24,3	н.в.	100,0
2_3	45,3	5,7	27,8	21,2	н.в.	100,0
середнє	38,6	5,5	33,5	22,4	н.в.	100,0
глиниста						
3_1	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.
3_2	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.
середнє	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.
убого-глиниста						
4_1	64,1	2,6	2,2	31,1	н.в.	100,0
4_2	62,8	3,8	0,7	32,7	н.в.	100,0
4_3	63,3	3,2	3,1	30,4	н.в.	100,0
середнє	63,4	3,2	2,0	31,4	н.в.	100,0

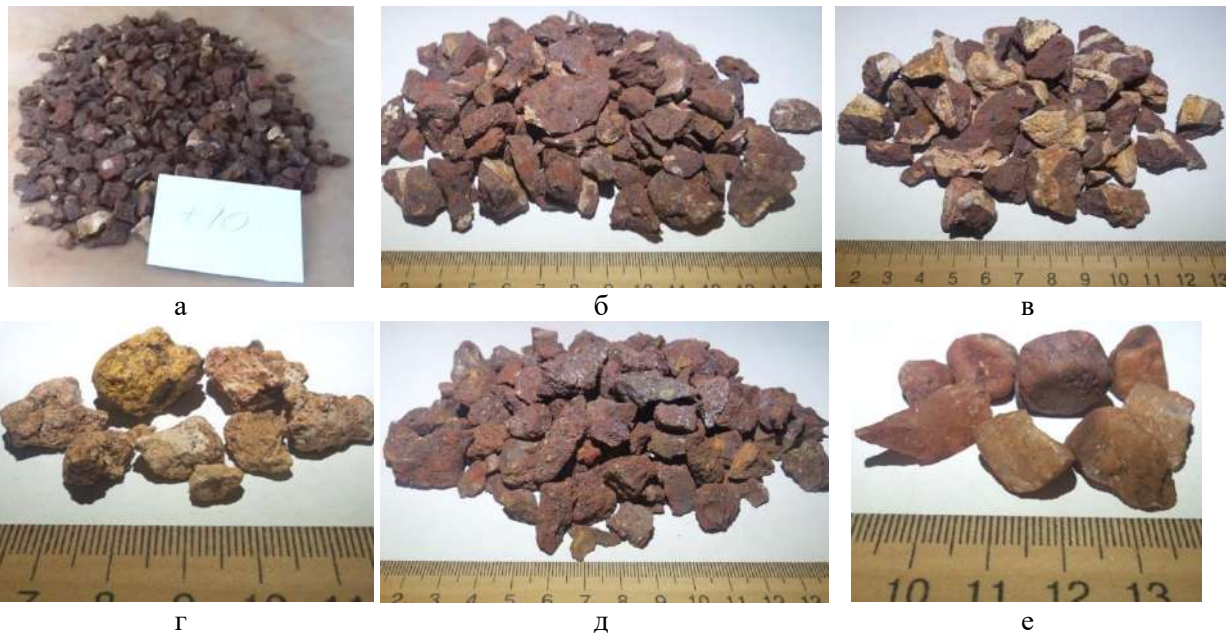


Рис. 4 – Матеріал класу крупності 10-20 мм: а – загальний вигляд; б-д – мінералого-петрологічні різновиди: б – мало-глинистий; в – середньо-глинистий; г – глинистий; д – убого-глинистий, е – уламки кварцу

Таблиця 4

Мінеральний склад мінералого-петрологічних різновидів,
що складають матеріал верхніх класів вихідної проби залізородної
сировини крупності 10-20 мм, визначений у відбитому світлі

Індекс проб	Мінерали					Сума
	диспергований гематит + гідрогематит	гетит + гідрогетит	глинистий мінерал	кварц	кальцит	
мало-глиниста						
1_1	66,5	3,3	6,3	21,1	2,8	100,0
1_2	64,2	5,7	6,4	21,3	2,4	100,0
середнє	65,4	4,5	6,3	21,2	2,6	100,0
середньо-глиниста						
2_1	34,4	3,9	37,9	20,7	3,1	100,0
2_2	27,6	7,8	35,3	26,5	2,8	100,0
2_3	42,1	5,4	26,7	22,4	3,4	100,0
середнє	34,7	5,7	33,3	23,2	3,1	100,0
глиниста						
3_1	3,5	3,5	87,9	5,1	0	100,0
3_2	1,7	3,9	89,9	4,5	0	100,0
середнє	2,6	3,7	88,9	4,8	0,0	100,0
убого-глиниста						
4_1	61,3	2,7	3,1	32,2	0,7	100,0
4_2	60,1	3,4	1,3	34,1	1,1	100,0
4_3	61,9	2,9	3,4	29,7	2,1	100,0
середнє	61,1	3,0	2,6	32,0	1,3	100,0

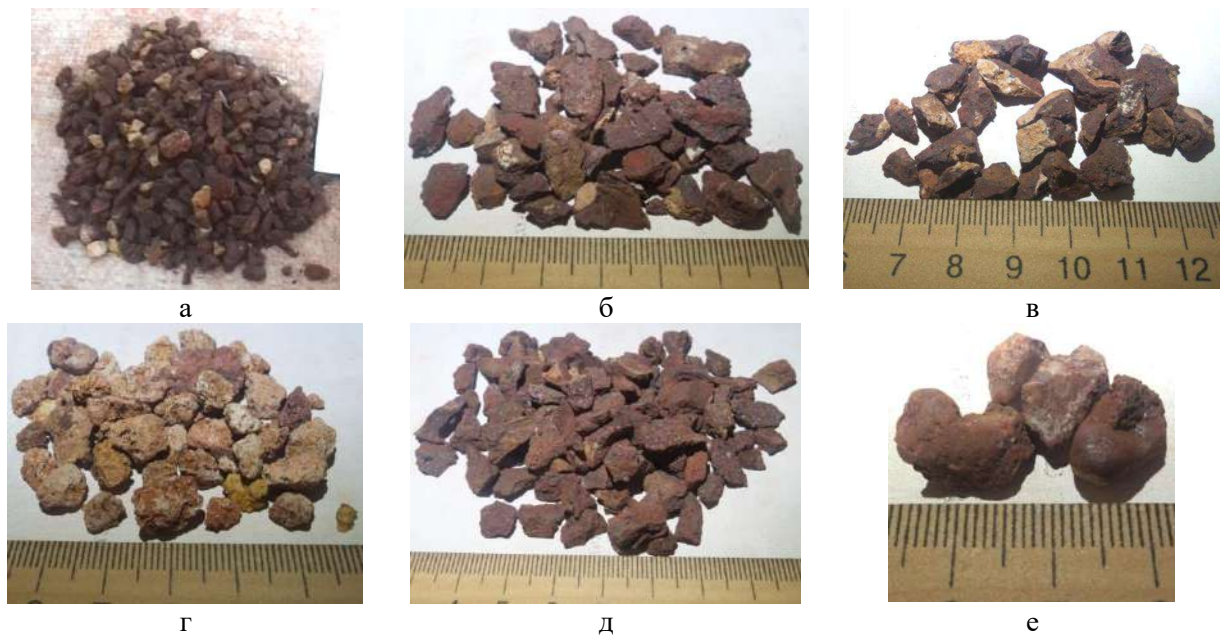


Рис. 5 – Матеріал класу крупності 5-10 мм: а – загальний вигляд; б-д – мінералого-петрологічні різновиди: б – мало-глинистий; в – середньо-глинистий; г – глинистий; д – убого-глинистий, е – уламки кварцу

Таблиця 5

Середній мінеральний склад мінералого-петрологічних різновидів, що складають матеріал верхніх класів вихідної проби залізородної сировини крупності 5-10 мм, визначений у прозорих та полірованих препаратах

Індекс проб	Мінерали					Сума
	диспергований гематит + гідрогематит	гетит + гідрогетит	глинистий мінерал	кварц	кальцит	
мало-глиниста						
1_1	66,7	3,2	6,4	20,9	2,8	100,0
1_2	64,0	5,6	6,1	21,9	2,4	100,0
середнє	65,4	4,4	6,3	21,4	2,6	100,0
середньо-глиниста						
2_1	34,5	3,7	37,5	21,2	3,1	100,0
2_2	28,7	7,6	35,5	25,4	2,8	100,0
2_3	41,9	5,6	27,3	21,8	3,4	100,0
середнє	35,3	6,6	31,4	23,6	3,1	100,0
глиниста						
3_1	3,5	3,5	87,9	5,1	0,0	100,0
3_2	1,7	3,9	89,9	4,5	0,0	100,0
середнє	2,6	3,7	88,9	4,8	0,0	100,0
убого-глиниста						
4_1	62,3	2,7	2,7	31,7	0,7	100,0
4_2	60,9	3,6	1,0	33,4	1,1	100,0
4_3	61,5	3,1	3,3	30,1	2,1	100,0
середнє	61,2	3,4	2,1	31,7	1,6	100,0

Висновки

1. Генетично вивчена сировина є продуктом хімічного вивітрювання вихідної вулканогенно-осадової породи. Структура породи дрібнозерниста, оолітова, місцями роговова, порфірова порфіроподібна, рідше псаммітова та псефітова. Текстура – порошоква, плямиста, місцями конгломератоподібна брекчіеподібна, пустотна, вкраплена, мигдалекам'яна.

2. Мінеральний склад представлений, в основному, дисперсним гематитом (Fe_2O_3), гідрогематитом ($Fe_2O_3 \cdot nH_2O$) та кварцем (SiO_2). Також є гетит ($FeOOH$), гідрогетит ($FeOOH \cdot nH_2O$), каолінит ($Al_2[Si_2O_5](OH)_4$) і кальцит ($Ca_2[CO_3]$). Відзначено одиничний вкрапленник халькопіриту ($CuFeS_2$).

3. Виконана рудорозборка представленої проби та проведений мінералого-петрологічний аналіз проб різної крупності.

4. Наступним етапом роботи буде виконання електронно-мікроскопічного аналізу сировини та опис властивостей мінералів, що присутні в дослідженій пробі залізної руди.

Перелік використаних джерел:

- Ghebre W.M. Opportunities for iron resources development in Ethiopia / W.M. Ghebre // The Seventh International Conference on the Geology of Africa. – November, 2013. – Pp. 15-29.
- Zeherudin I. Study of development of iron ore and metallurgy industries: challenges, prospects and policy/strategy options / I. Zeherudin, A. Baraki, H. Berhe // FDRE, Policy Study and Research Center. – Addis Ababa, Ethiopia, 2017. – 175 p.
- Abd El-Wahed M. Genesis of the gneissic core complexes in the Arabian-Nubian Shield and its tectonic implications: A regional overview / M. Abd El-Wahed, M. Attia // Journal of Asian Earth Sciences. – 2022. – Volume 236. – Article 105337. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2022.105337>.
- De Fino M. Geology and volcanology of the Edd-Bahar Assoli area (Ethiopia) / M. De Fino, L. La Volpe, L. Lirer // Bulletin Volcanologique. – 1978. – Vol. 41 – Pp. 32-42(1978). – Mode of access:

cess: <https://doi.org/10.1007/BF02597681>.

5. Relations between Tectonics and Magmatology in the Northern Danakil Depression (Ethiopia) / F. Barberi, S. Borsi, G. Ferrara, G. Marinelli, J. Varet // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. – 1970. – Article 267. – Pp. 292-311. – (Series A. Mathematical and Physical Sciences).
6. Ahmed H. Magmatic (Orthomagmatic) Deposits (Ore Deposits Associated with Mafic–Ultramafic Complexes). In: *Mineral Deposits and Occurrences in the Arabian-Nubian Shield* / H. Ahmed // *Earth and Environmental Sciences Library*. – 2022. – Pp. 89-165. – 512 p. – Mode of access: https://doi.org/10.1007/978-3-030-96443-6_3.

References:

1. Wondafrash Mammo Ghebre. Opportunities for iron resources development in Ethiopia. *The Seventh International Conference on the Geology of Africa*, 2013, pp. 15-29.
2. Zeherudin I., Baraki A., Berhe H. Study of development of iron ore and metallurgy industries: challenges, prospects and policy/strategy options. Ethiopia, 2017. 175 p. (Eng.)
3. Abd El-Wahed M., Attia M. Genesis of the gneissic core complexes in the Arabian-Nubian Shield and its tectonic implications: A regional overview. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2022, vol. 236, article 105337. doi: 10.1016/j.jseaes.2022.105337.
4. De Fino M., La Volpe L., Lirer L. Geology and volcanology of the Edd-Bahar Assoli area (Ethiopia). *Bulletin Volcanologique*, 1978, vol. 41, pp. 32-42 (1978). doi: 10.1007/BF02597681.
5. Barberi F., Borsi S., Ferrara G., Marinelli G., Varet J. Relations between Tectonics and Magmatology in the Northern Danakil Depression (Ethiopia). *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1970, article 267, pp. 292-311.
6. Ahmed H. Magmatic (Orthomagmatic) Deposits (Ore Deposits Associated with Mafic–Ultramafic Complexes). In: *Mineral Deposits and Occurrences in the Arabian-Nubian Shield*. *Earth and Environmental Sciences Library*, 2022. 512 p. doi: 10.1007/978-3-030-96443-6_3.

Рецензент: В.Й. Засельський,
д-р техн. наук, проф., ННТІ ДУЕТ

Стаття надійшла 23.04.2022

141 ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

УДК 621.316.11:621.67

doi: 10.32782/2225-6733.44.2022.4

© Лисяк В.Г.*

ДИНАМІЧНІ РЕЖИМИ ПАРАЛЕЛЬНО ПРАЦЮЮЧИХ АСИНХРОННИХ ВІДЦЕНТРОВИХ ГІДРОАГРЕГАТІВ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ

Проведено аналіз основних чинних нормативних положень, які регулюють функціонування трубопровідного транспорту. Обґрунтовано системний підхід до дослідження процесів у електротехнічних комплексах потужних насосних станцій, який передбачає композицію їхніх підсистем різної фізичної природи в єдине ціле. Показано, що модернізація насосного обладнання магістральних комплексів робить вагомим потенціал енергозбереження в динамічних режимах. Побудовано формалізовану математичну модель динамічних режимів паралельно працюючих асинхронних відцентрових гідроагрегатів узагальненої насосної станції, яка дозволяє врахувати вплив експлуатаційних та аварійних змін характеристик елементів гідравлічної підсистеми та фізичних параметрів рідини. Запропоновано перспективи використання, шляхи вдосконалення та розширення функціоналу одержаної моделі.

Ключові слова: асинхронний двигун, відцентровий насос, математична модель, трубопровід.

V.H. Lysiak. Dynamic modes of parallel asynchronous centrifugal hydraulic units of the electrotechnical complex of the pumping station. An analysis of the main current regulations governing the operation of pipeline transportation has been performed. Based on this analysis, an approach to the study of processes in electrical complexes of powerful pumping stations, which provides the composition of their subsystems of different physical nature into a single whole has been grounded. Gradual replacement of obsolete pumping equipment of main complexes of liquid transportation with small (75-80%) efficiency for new units with significantly higher (up to 90%) efficiency sets up significant and economically feasible energy saving potential not only in quasi-stationary but in dynamic modes as well. The review of the current state of scientific research of electrical complexes of pumping stations gives grounds to conclude that the generally accepted approach to modelling is not systematic enough. A mathematical model of dynamic modes of parallel asynchronous centrifugal hydraulic units of the electrical complex of the pumping station has been made up. The model is an effective tool for computer research of the pumping stations operation as a whole and their individual subsystems of different physical nature with the aim of improving the energy efficiency. The use in the model of such parameters of centrifugal pumps, which are determined by the geometric dimensions of their structural elements and the properties of the working fluid, makes it possible to take into account the impact of changes in the characteristics of hydraulic subsystem elements on operating modes. Formalization of the vector-matrix form of writing down the equations as well as the modular principle of model construction greatly facilitate the automation of the process of equation formation. Complementing the developed mathematical model with a physical model of the control system will make it possible to obtain an effective tool for forecasting future and

* канд. техн. наук, доцент, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, ORCID: 0000-0002-8371-6455, vladyslav.h.lysiak@lpnu.ua

optimizing the current modes of operation of such complexes without conducting physical experiments on powerful equipment.

Keywords: *asynchronous motor, centrifugal pump, mathematical model, pipeline.*

Постановка проблеми. Транспортування великих об'ємів рідини до розподільчих трубопроводів (ТП) забезпечують великі транзитні об'єкти – магістральні ТП та насосні станції (НС). Потужні НС магістральних нафто- та водопроводів є споживачами великих обсягів електроенергії. Однією з найпотужніших у світі систем магістральних нафтових ТП володіє Україна. «Магістральний трубопровід – технологічний комплекс, що функціонує як єдина система і до якого входить окремий трубопровід з усіма об'єктами і спорудами, зв'язаними з ним єдиним технологічним процесом, або кілька трубопроводів, якими здійснюються транзитні, міждержавні, міжрегіональні поставки продуктів транспортування споживачам, або інші трубопроводи, спроектовані та збудовані згідно з державними будівельними вимогами щодо магістральних трубопроводів» (закон України «Про трубопровідний транспорт» [1]); у цьому ж законі прописані алгоритми випробувань і діагностики магістральних ТП. У нормативних документах [2] і [3] сформульовані вимоги до безперебійності, надійності, безпеки експлуатації, дефектоскопії та діагностики діючих, а також проектування нових комплексів. Зазвичай, доступними є лише проведення регламентованих в [1] дефектоскопії та діагностики, а також моніторинг квазістаціонарних [4] експлуатаційних режимів. В інших випадках фізичне експериментування з перехідними процесами над такими діючими об'єктами є важко здійсненним або неможливим з цілої низки об'єктивних причин [5]. Зважаючи на нерозривність функціонування підсистем різної фізичної природи, з яких складаються такі комплекси, [1] та на проблематичність проведення натурних експериментів зі силовою частиною, перспективним є гібридне моделювання, яке передбачає поєднання комп'ютерної моделі силового обладнання та фізичної моделі мікропроцесорної системи автоматичного керування [6]. Оптимізація споживання енергії потребує всебічного аналізу стаціонарних і динамічних [7] режимів роботи як під час експлуатації діючих, так і на стадії проектування нових електротехнічних комплексів магістральних ТП.

Заміна відцентрових насосів (ВН) НС на сучасні моделі з високим к.к.д. (близько 90% замість 75-80% у застарілих агрегатів) збільшує та робить відчутною частку потенціалу енергозбереження саме в динамічних режимах. Про це свідчить проведений в [8] аналіз, який доводить доцільність частотного керування електроприводом ВН, яка залежить, зокрема, і від к.к.д. самих ВН.

Наведені факти обґрунтовують необхідність удосконалення існуючих та створення нових безпечних засобів для ненатурного дослідження роботи великих багатоагрегатних НС.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У більшості робіт, присвячених дослідженню процесів, які відбуваються в технологічних комплексах ТП, зазвичай акцент робиться на поглибленні математичного опису лише однієї окремої підсистеми: або гідравлічної [9, 10], або електромеханічної [11, 12]. Застосування цільових функцій для оптимізації енергетичних та інших загальних показників технологічних комплексів НС [13, 14] дає важливу загальну інтегральну оцінку режимів їхньої роботи; імітаційні моделі (наприклад, [9, 15]) дають змогу одержати детальнішу інформацію про низку координат режиму. Такий підхід, однак, не відтворює сутності фізичних процесів. Праці [16], [17] присвячені достатньо детальному математичному опису гідравлічної та електромеханічної підсистем одиничного асинхронного електроприводного відцентрового насосного агрегату, однак моделювання динамічних режимів спільної їхньої роботи залишено невирішеним.

Аналіз цих та інших праць дає підстави зробити висновок про недостатню системність підходу до моделювання та дослідження процесів, які відбуваються в нерозривно пов'язаних електромеханічній та гідравлічній частинах електротехнічних комплексів магістральних ТП.

Метою даної роботи є побудова формалізованої математичної моделі динамічних режимів паралельно працюючих асинхронних відцентрових гідроагрегатів (АВН) електротехнічного комплексу насосної станції, яка дозволить досліджувати взаємний вплив складових його підсистем різної фізичної природи, оперуючи при цьому внутрішніми параметрами окремих елементів.

Виклад основного матеріалу. Для побудови узагальненої математичної моделі системи паралельно працюючих АВН НС використано представлені у [16] модель ВН та модель АД

(рівняння записані в системі d-q координат, жорстко зв'язаних зі спільним валом ВН та АД). Ідентифікація параметрів ВН здійснюється за геометричними розмірами його внутрішніх елементів із урахуванням впливу на параметри кінематичної в'язкості та густини робочої рідини [18].

Оскільки в загальному випадку паралельно можуть працювати неоднакові АВН, для запису рівнянь кожного з агрегатів використано окрему систему відносних одиниць з базовими величинами, характерними для кожного них [16].

На рис. 1 наведено узагальнену схему паралельного сполучення гідротрактами насосів АВН, які входять до складу багатоагрегатної НС.

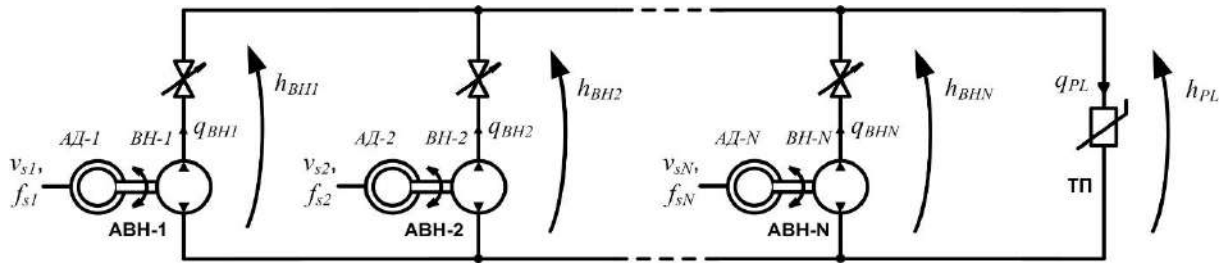


Рис. 1 – Узагальнена схема гідравлічних паралельних сполучень АВН багатоагрегатної НС

Узагальнена система АВН багатоагрегатної НС, у складі якої N відцентрових насосів паралельно працюють на спільний трубопровід, описується системою з $19 \cdot N + 2$ рівнянь:

$$\overline{\mathbf{D}}_i = \overline{\mathbf{P}}_i \times \overline{\mathbf{Q}}_i + \overline{\mathbf{P}}_{0i} \times \mathbf{h}_{0i} + \overline{\mathbf{V}}_i, \quad i = \overline{1, N} \quad (16 \cdot N \text{ рівнянь}); \quad (1)$$

$$h_{L,d} q_{33,q} - h_{L,q} q_{33,d} = 0, \quad i = \overline{1, N} \quad (N \text{ рівнянь}); \quad (2)$$

$$\frac{d\omega_i}{dt} = \frac{T_{am,b_i} (\psi_{\delta,d} i_{s,q} - \psi_{\delta,q} i_{s,d}) - T_{cp,b_i} H_{0,nom_i} \omega_i \frac{\omega_{am,b_i}}{\omega_{cp,b_i}} \sqrt{(q_{11,d} + q_{44,d})^2 + (q_{11,q} + q_{44,q})^2} - \Delta T_{m0_i} \omega_i^2}{J_{\Sigma_i} \omega_{am,b_i}}, \quad i = \overline{1, N} \quad (N \text{ рівнянь}); \quad (3)$$

$$\left(\frac{H_{cp,b_i}}{H_{cp,b_{i+1}}} \right)^2 (h_{L,d}^2 + h_{L,q}^2) = (h_{L_{i+1},d}^2 + h_{L_{i+1},q}^2), \quad i = \overline{1, N-1} \quad (N-1 \text{ рівнянь}); \quad (4)$$

$$h_L = \left(\frac{H_{cp,b_i}}{H_b} \right) \sqrt{h_{L,d}^2 + h_{L,q}^2}, \quad i - \text{довільне в діапазоні від 1 до } N \quad (1 \text{ рівняння}); \quad (5)$$

$$q_L = \sum_{i=1}^N \frac{Q_{cp,b_i}}{Q_b} q_{L_i} \quad (1 \text{ рівняння}); \quad (6)$$

$$dq_L/dt = -(r_L/L_L) q_L + (1/L_L) h_L - (1/L_L) h_{st} \quad (1 \text{ рівняння}), \quad (7)$$

де $\overline{\mathbf{Q}}_i = (q_{11i}, q_{22i}, q_{33i}, q_{44i}, i_{s_i}, i_{r_i}, e_{\delta_i}, \psi_{\delta_i})_i$; $\overline{\mathbf{P}}_{0i} = (-1/L_{1i}, -1/L_{2i}, -1/L_{3i}, 1/L_{mech_i}, 0, 0, 0, 0)_i$;

$\mathbf{h}_{0i} = \omega_i^2 H_{0,nom_i} \left(\frac{\omega_{am,b_i}}{\omega_{cp,b_i}} \right)^2 \left(\cos(\omega_i \omega_{am,b_i} t + \Psi_{0cp_i}) + j \sin(\omega_i \omega_{am,b_i} t + \Psi_{0cp_i}) \right) = h_{0,d} + j h_{0,q}$;

$\overline{\mathbf{D}}_i = (dq_{11i}/dt, dq_{22i}/dt, dq_{33i}/dt, dq_{44i}/dt, di_{s_i}/dt, di_{r_i}/dt, d\psi_{\delta_i}/dt, 0)_i$;

$\overline{\mathbf{V}}_i = (0, 0, 0, 0, v_{s_i}/L_{s_i}, 0, 0, 0)_i$; ω_{am,b_i} , T_{am,b_i} – базові значення частоти та моменту i -го АД;

ω_{cp,b_i} , H_{cp,b_i} , Q_{cp,b_i} – базові значення частоти, напору та об'ємної витрати робочої рідини i -го ВН;

H_b, Q_b – базові значення напору та об’ємної витрати ТП;

$$\tilde{\mathbf{P}}_i = \begin{pmatrix} \frac{r_{11_i}}{L_{11_i}} & \frac{r_{21_i}}{L_{12_i}} & \frac{r_{22_i}}{L_{12_i}} & \frac{r_{32_i}}{L_{13_i}} & \frac{r_{33_i}}{L_{13_i}} & \frac{r_{23_i}}{L_{12_i}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{r_{11_i}}{L_{21_i}} & \frac{r_{21_i}}{L_{22_i}} & \frac{r_{22_i}}{L_{22_i}} & \frac{r_{32_i}}{L_{23_i}} & \frac{r_{33_i}}{L_{23_i}} & \frac{r_{23_i}}{L_{22_i}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{r_{11_i}}{L_{31_i}} & \frac{r_{21_i}}{L_{32_i}} & \frac{r_{22_i}}{L_{32_i}} & \frac{r_{32_i}}{L_{33_i}} & \frac{r_{33_i}}{L_{33_i}} & \frac{r_{23_i}}{L_{32_i}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-r_{mech_i}(q_{L_i})}{L_{mech_i}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-R_{s_i}}{L_{s_i}} - j\omega_{s_i} & 0 & 0 & \frac{-1}{L_{s_i}} & \frac{-j\omega_{s_i}}{L_{s_i}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-\omega_{s_i} R_{r_i}}{L_{r_i}} - j(\omega_{s_i} - \omega_{r_i}) & \frac{-\omega_{s_i}}{L_{r_i}} & \frac{j(\omega_{s_i} - \omega_{r_i})}{L_{r_i}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & -R_{m_i}(\psi_{\delta_i}) - \frac{j\omega_{s_i}}{R_{a_i}} & 0 \end{pmatrix}$$

де $q_L = \sqrt{q_{Ld}^2 + q_{Lq}^2} = \sqrt{q_{33d_i}^2 + q_{33q_i}^2}$ (i – довільне в діапазоні від 1 до N), $h_L = \sqrt{h_{Ld}^2 + h_{Lq}^2}$ – сумарна об’ємна витрата робочої рідини на вході трубопроводу та напір цієї рідини, відповідно; h_{st} – статичний протинапір трубопроводу; $\mathbf{v}_{si} = v_{sid} + jv_{siq}$, ω_{s_i} , ω_{r_i} – напруга статора, частота напруги статора АД та частота обертання вала i -го АВН; t – час. Детальне пояснення інших величин, що входять до складу вищенаведених рівнянь, наведено в [16], [18].

Кожний окремих АВН описується рівняннями (1), (2) та (3); паралельне з’єднання ВН усіх АВН та робота їх усіх на спільний ТП задається рівняннями (4), (5) та (6); спрощену модель ТП представлено рівнянням (7).

Працездатність і коректність моделі було верифіковано в системі Mathcad шляхом її адаптації до двоагрегатної системи АВН, яка складається з однакових агрегатів (їхні параметри наведені в таблицях 1 і 2; електроживлення обох АД відбувалось зі спільних шин від системи з $R_{с.ном} = 0,04$ Ом, $X_{с.ном} = 0,32$ Ом), та виконання тестових розрахунків нижчеописаних експлуатаційних та аварійних режимів. Момент інерції ВН враховано як 15% моменту інерції АД.

Таблиця 1

Параметри АД-1, АД-2 типу 4АН355М6У3

$P_{ном}$, кВт	$\eta_{ном}$	$V_{с.ном}$, В	$n_{ном}$, об/хв	$\cos\phi_{ном}$	p_0	$T_{макс}^*$	$T_{мін}^*$	T_s^*	I_s^*	$J_{ам}$, кг·м ²
250	0,935	380	985	0,9	3	2,2	0,9	1,4	7	9,5

Таблиця 2

Параметри ВН-1, ВН-2 типу 14НДс-Н

$H_{ном}$, М	$Q_{ном}$, М ³ /ГОД	$\eta_{ном}$	$n_{ном}$, об/хв	$P_{с.ном}$, кВт	$H_{0.ном}^*$	$R_{\Delta Q}^*$	$L_{\Delta Q}^*$	$R_{\Delta H}^*$	$L_{\Delta H}^*$	L_t^*	$L_{\mu H}^*$	$L_{\mu Q}^*$	R_{mech}^*	L_{mech}^*
45	1260	0,809	980	154	1,302	29,47	9,49	$6,627 \cdot 10^{-4}$	0,4144	0,00876	0,0352	0,2375	7,180	0,02287

Прямий пуск АД-1 агрегату АВН-1 починався у момент часу $t = 0,1$ с; прямий пуск АД-2 агрегату АВН-2 починався у момент часу $t = 2,0$ с (гідравлічні запірні вентиля ВН були закриті до завершення процесу пуску відповідних їм АД). Після завершення пуску АД-1 в момент часу $t = 5,0$ с на протязі 0,5 с плавно відкрився гідравлічний запірний вентиль насоса ВН-1; після завершення пуску АД-2 в момент часу $t = 8,0$ с на протязі 0,5 с плавно відкрився гідравлічний

запірний вентиль насоса ВН-2. Вплив повної розгерметизації (обриву) ТП змодельовно шляхом короткого замикання, яке виникло в момент часу $t = 11,0$ с і рівномірно наростало протягом $0,1$ с. Після виникнення цієї аварійної ситуації в момент часу $t = 13,0$ с протягом $0,5$ с плавно одночасно перекрилися гідравлічні запірні вентилі насосів обох агрегатів. Окремі результати комп'ютерних експериментів наведені на рис. 2-9. На цих же рисунках додатково наведені каталожні параметри ВП та розраховані за каталожними даними номінальні параметри АД.

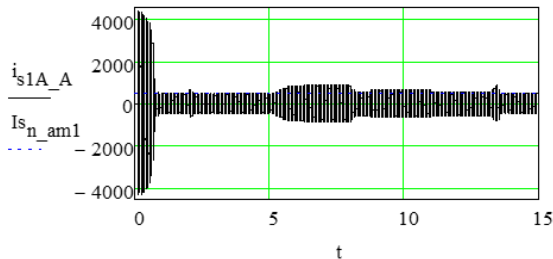


Рис. 2 – Струм фази А статора АД-1, А

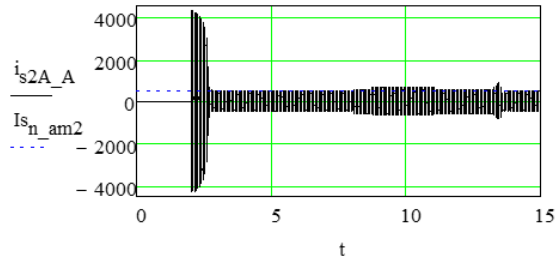


Рис. 3 – Струм фази А статора АД-2, А

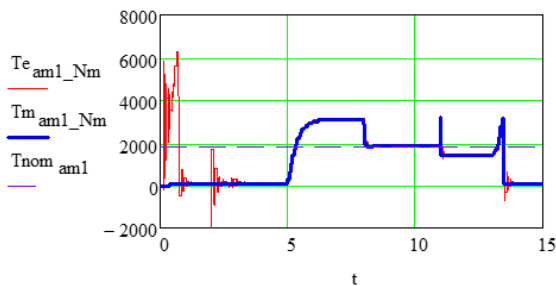


Рис. 4 – Електромагн. і мех. моменти АД-1, Н·м

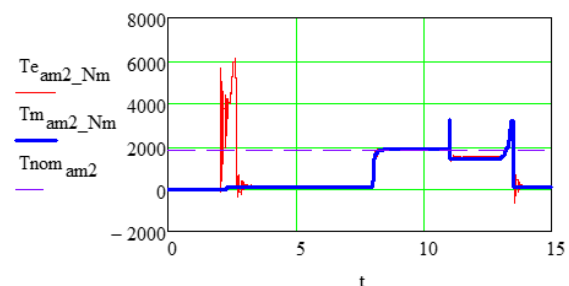


Рис. 5 – Електромагн. і мех. моменти АД-2, Н·м

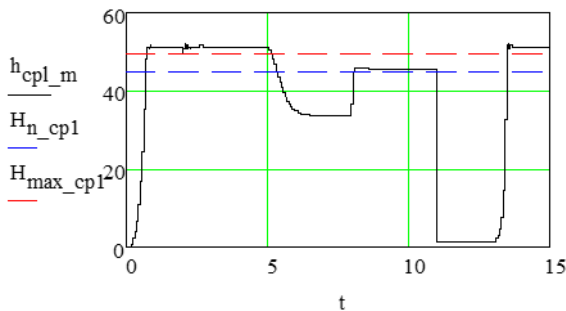


Рис. 6 – Напір робочої рідини ВН-1, м

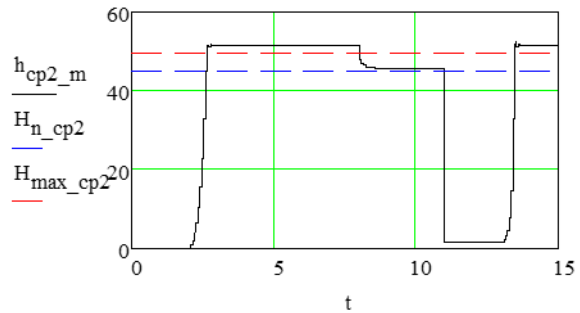


Рис. 7 – Напір робочої рідини ВН-2, м

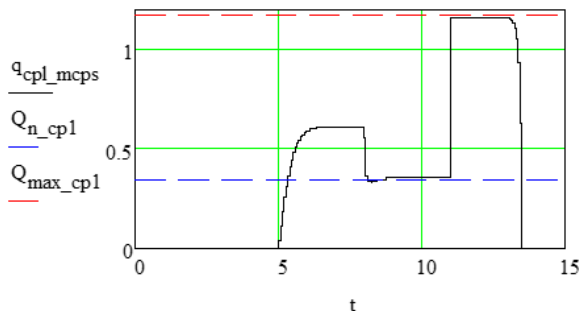


Рис. 8 – Витрата робочої рідини ВН-1, м³/с

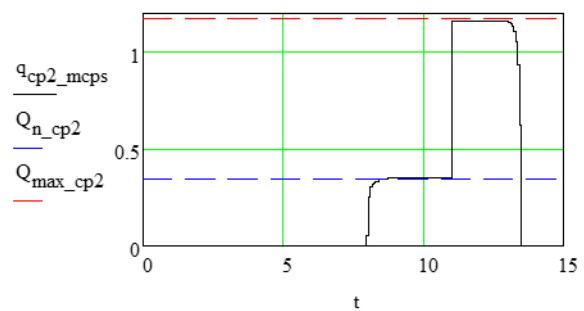


Рис. 9 – Витрата робочої рідини ВН-2, м³/с

Збіжність номінальних каталожних параметрів агрегатів та одержаних в результаті комп'ютерних експериментів координат граничних і номінальних стаціонарних режимів, а також

характер протікання перехідних процесів в електромеханічній та гідравлічній підсистемах НС дають підстави зробити висновок про коректність розробленої математичної моделі.

Висновки

Розроблено математичну модель динамічних режимів паралельно працюючих асинхронних відцентрових гідроагрегатів електротехнічного комплексу насосної станції. Одержана модель є ефективним інструментом для комп'ютерних досліджень режимів роботи насосних станцій як в цілому, так і їхніх окремих підсистем різної фізичної природи з урахуванням взаємного впливу з метою підвищення енерго- та ресурсоефективності. Застосування в моделі таких параметрів відцентрових насосів, ідентифікація яких проводиться за геометричними габаритами їх конструктивних елементів і властивостями робочої рідини, дозволяє врахувати вплив експлуатаційних та аварійних змін характеристик елементів гідравлічної підсистеми на режими роботи. Формалізація векторно-матричної форми запису рівнянь та модульний принцип побудови моделі значно розширюють можливості її практичного застосування для досліджень режимів роботи електротехнічних комплексів багатоагрегатних насосних станцій шляхом автоматизації процесу формування рівнянь. Доповнення розробленої математичної моделі фізичною моделлю системи керування дасть змогу одержати ефективний інструмент для прогнозування майбутніх та оптимізації поточних режимів роботи таких комплексів без проведення фізичних експериментів на силовому обладнанні.

Перелік використаних джерел:

1. Про трубопровідний транспорт [Електронний ресурс]: Закон України від 15.05.1996 р. № 192/96-ВР // Відомості Верховної Ради (ВВР). – 1996. – № 29. – Ст. 139. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/192/96-%D0%B2%D1%80#Text>.
2. ДБН В.2.5-74:2013 Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. – Введ. 2014-01-01. – Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2013. – 172 с. – Режим доступу: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-1084>.
3. Про затвердження Правил безпеки під час експлуатації магістральних нафтопроводів: Наказ Державного комітету України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду від 23.05.2007 р. № 110. – Держгірпромнагляду, 2007. – 78 с. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1389-07>.
4. Моделювання усталених режимів електромережі із синхронним електроприводом гідравлічного навантаження / В.Г. Лисяк, М.Й. Олійник, М.Б. Сабат, Ю.Л. Шелех // Електроенергетичні та електромеханічні системи. – 2019. – Вип. 1, № 1. – С. 36-45. – Режим доступу: <https://doi.org/10.23939/sepes2019.01.036>.
5. Федоров А.В. Система бесперебойного электроснабжения технологических объектов нефтегазового комплекса : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Алексей Вячеславович Федоров. – Санкт-Петербург, 2016. – 20 с.
6. MMC-HVDC Simulation and Testing Based on Real-Time Digital Simulator and Physical Control System / K. Ou [et al.] // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. – 2014. – Vol. 2, no. 4. – Pp. 1109-1116. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2014.2337512>.
7. Мукани Эме Б. Режимы работы систем электроснабжения объектов нефтегазовых месторождений : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Борис Мукани Эме. – Москва, 2011. – 25 с.
8. Мухортов И.С. Повышение энергетической эффективности группы электроприводов систем поддержания пластового давления : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Иван Сергеевич Мухортов. – Самара, 2014. – 25 с.
9. Андрушак С.В. Математическое и имитационное моделирование процесса транспорта и дозирования шлама / С.В. Андрушак, П.В. Беседин // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Экономика. Информатика. – 2016. – № 16. – С. 115-122.
10. Мелихов А.Ю. Разработка энергосберегающего алгоритма управления плавным пуском асинхронных двигателей насосной станции. Часть 3. Математическая модель

- гидравлической подсистемы насосной станции / А.Ю. Мелихов // Системы управления и информационные технологии. – 2009. – № 3-2(37). – С. 263-267.
11. Костишин В.С. Аналіз показників ефективності та надійності роботи насосного агрегату на засадах системного підходу / В.С. Костишин, І.І. Яремак // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2017. – № 1. – С. 50-60.
 12. Куцик А.С. Математична модель системи «частотно-керований електропривод – насос – водопровідна мережа» / А.С. Куцик, А.О. Лозинський, О.Ф. Кінчур // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2015. – № 834. – С. 48-55. – (Серія: Електроенергетичні та електромеханічні системи).
 13. Яремак І.І. Багатоцільова оптимізація установчих режимів роботи електроприводної нафтоперекачувальної станції / І.І. Яремак, В.С. Костишин // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2018. – Вип. 1. – С. 15-21. – Режим доступу: <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2018.1.15-21>.
 14. Лезнов Б.С. Применение регулируемого электропривода в насосных установках систем водоснабжения и водоотведения / Б.С. Лезнов // Экологические системы: электронный журнал энергосервисной компании. – Кременчуг, 2010. – № 11. – С. 9-12.
 15. Misiunas D. Burst Detection and Location in Pipelines and Pipe Networks with application in water distribution systems / D. Misiunas. – Sweden : Lund, Department of Industrial Electrical Engineering and Automation Lund University, 2004. – 113 p.
 16. Лисяк В.Г. Моделювання динамічних режимів роботи асинхронного електроприводу з відцентровим насосним навантаженням / В.Г. Лисяк, М.Й. Олійник // Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. праць. – Маріуполь: ДВНЗ «Приазов. держ. техн. ун-т», 2021. – Вип. 42. – С. 113-121. – (Серія: Технічні науки). – Режим доступу: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.42.2021.240665>.
 17. Костишин В.С. Дослідження динамічних режимів роботи електроприводних відцентрових насосних агрегатів за допомогою їхніх комп'ютерно-орієнтованих Bond Graph моделей / В.С. Костишин, П.О. Курляк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 2. – С. 148-153.
 18. Костишин В.С. Моделювання режимів роботи відцентрових насосів на основі електрогидравлічної аналогії : дис. ... д-ра техн. наук : 05.15.13 / Костишин Володимир Степанович; Івано-Франківський національний техн. ун-т нафти і газу. – Івано-Франківськ, 2003. – 342 с.

References:

1. *Zakon Ukrainy № 192/96-VR vid 15.05.1996 r. Pro truboprovodnyi transport* [Law of Ukraine № 192/96-BP dated 15.05.1996. About pipeline transport] Available at: www.zakon.rada.gov.ua/laws/show/192/96-%D0%B2%D1%80#Text (accessed 14 January 2021). (Ukr.)
2. *Derzhavni budivel'ni normi V.2.5-74:2013 Vodopostachannia. Zovnishni merezhi ta sporudy. Osnovni polozhennia proektuvannia* [State construction standards V.2.5-74:2013 Water supply. Zovnishni merezhi ta sporudi. Basic provisions of the design]. Kyiv, 2013. 172 p. Available at: www.dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-1084 (accessed 14 January 2021). (Ukr.)
3. *Nakaz Derzhavnoho komitetu Ukrainy z promyslovoi bezpeky, okhorony pratsi ta hirnychoho nahliadu № 1389/14656 vid 19.12.2007 r. Pro zatverdzhennia Pravyl bezpeky pid chas ekspluatatsii mahistralnykh naftoprovodiv* [Order of the State Committee of Ukraine for Industrial Safety, Labor Protection and Mining Supervision № 110 dated 23.05.2007. On approval of the Safety Rules during the operation of main oil pipelines]. Kyiv, 2007. 78 p. Available at: www.zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1389-07 (accessed 14 January 2021). (Ukr.)
4. Lysiak V.H., Oliinyk M.I., Sabat M.B., Shelekh Yu.L. Modeliuvannia ustalenykh rezhymiv elektromerezh iz synkhronnym elektropyvodom hidravlichnoho navantazhennia [Simulation of steady-state power grid modes with synchronous electric drive hydraulic load]. *Elektroenerhetychni ta elektromekhanichni systemy – Electrical Power and Electromechanical Systems*, 2019, vol. 1, № 1, pp. 36-45. doi: 10.23939/sepes2019.01.036. (Ukr.)
5. Fedorov A.V. *Systema bespereboinoho elektrosnabzhenyia tekhnolohycheskykh objektov nefte hazovoho kompleksa*. Avtoref. diss. kand. techn. nauk [Uninterruptible power supply system of technological facilities of the oil and gas complex. Cand. tech. sci. diss. thesis]. St. Petersburg,

2016. 20 p. (Rus.)
6. Ou K., Rao H., Cai Z., Guo H., Lin X., Guan L., Maguire T., Warkentin B., Chen Y. MMC-HVDC Simulation and Testing Based on Real-Time Digital Simulator and Physical Control System. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2014, vol. 2, no. 4, pp. 1109-1116. doi: **10.1109/JESTPE.2014.2337512**.
 7. Mukani Eme B. *Rezhimy raboty sistem elektrosnabzheniia ob'ektov neftegazovykh mestorozhdenii*. Avtoref. diss. kand. techn. nauk [Modes of operation of power supply systems of oil and gas fields. Cand. tech. sci. diss. thesis]. Moscow, 2011. 25 p. (Rus.)
 8. Mukhortov I.S. *Povyshenie energeticheskoi effektivnosti gruppy elektroprivodov sistem podderzhaniiia plastovogo davleniia*. Avtoref. diss. kand. techn. nauk [Improving the energy efficiency of a group of electric drives of reservoir pressure maintenance systems. Cand. tech. sci. diss. thesis]. Samara, 2014. 25 p. (Rus.)
 9. Andrushak S.V., Besedin P.V. Matematicheskoe i imitatsionnoe modelirovanie protsessa transporta i dozirovaniia shlama [Mathematical and simulation modeling of the process of sludge transport and dosing]. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekonomika. Informatika – Belgorod State University. Scientific Bulletin. Series: Economics. Information technologies*, 2016, № 16, pp. 115-122. (Rus.)
 10. Melikhov A.Iu. Razrabotka energosberegaiushchego algoritma upravleniia plavnym puskom asinkhronnykh dvigatelei nasosnoi stantsii. Chast' 3. Matematicheskaia model' gidravlicheskoj podsystemy nasosnoi stantsii [Development of an energy-saving algorithm for controlling the smooth start of asynchronous motors of a pumping station. Part 3. Mathematical model of hydraulic sub-system of pumping station]. *Sistemy upravleniia i informatsionnye tekhnologii – Automation and Remote Control*, 2009, № 3-2(37), pp. 263-267. (Ukr.)
 11. Kostishin V.S., Iaremak I.I. Analiz pokaznikov effektivnosti ta nadiinosti roboti nasosnogo agregatu na zasadakh sistemnogo pidkhodu [Analysis of efficiency and reliability of the pump unit on the basis of a systematic approach]. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i gazovykh rodovishch – Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*, 2017, № 1, pp. 50-60. (Ukr.)
 12. Kutsik A.S., Lozins'kii A.O., Kinchur O.F. Matematichna model' sistemi «chastotno-kerovanii elektroprivod – nasos – vodoprovodna mreza» [Mathematical model of the system «frequency-controlled electric drive - pump - water supply network»]. *Visnik Natsional'nogo universitetu «Lviv's'ka politehnika». Serii: Elektroenergetichni ta elektromekhanichni sistemi – Bulletin of Lviv Polytechnic National University. Series: Electrical Power and Electromechanical Systems*, 2015, № 834, pp. 48-55. (Ukr.)
 13. Iaremak I.I., Kostishin V.S. Bagatotsil'ova optimizatsiia ustanovchikh rezhimiv roboti elektroprivodnoi naftoperekachuval'noi stantsii [Multi-purpose optimization of the operating modes of the electric oil pumping station]. *Visnik Kremenchuts'kogo natsional'nogo universitetu imeni Mikhaila Ostrograds'kogo – Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyyi National University*, 2018, vol. 1, pp. 15-21. doi: **10.30929/1995-0519.2018.1.15-21**. (Ukr.)
 14. Leznov B.S. Primenenie reguliruemogo elektroprivoda v nasosnykh ustanovkakh sistem vodosnabzheniia i vodootvedeniia [Application of the regulated electric drive in pump installations of systems of water supply and drainage]. *Ekologicheskie sistemy: elektronnyi zhurnal energoservisnoi kompanii – Ecological systems: electronic journal of the energy service company*, 2010, № 11, pp. 9-12. (Rus.)
 15. Misiunas D. Burst Detection and Location in Pipelines and Pipe Networks with application in water distribution systems. Lund, Department of Industrial Electrical Engineering and Automation Lund University Publ., 2004. 113 p.
 16. Lysiak V.H., Oliinyk M.Y. Modeliuvannia dinamichnikh rezhimiv roboti asinkhronnogo elektroprivodu z vidtsentrovim nasosnim navantazhenniam [Simulation of dynamic operating modes of asynchronous electric drive with cen-trifugal pump load]. *Visnik Priazovs'kogo Derzhavnogo Tekhnichnogo Universitetu. Serii: Tekhnichni nauki – Reporter of the Priazovskyyi State Technical University. Section: Technical sciences*, 2021, vol. 42, pp. 113-121. doi: **10.31498/2225-6733.42.2021.240665**. (Ukr.)
 17. Kostishin V.S., Kurliak P.O. Doslidzhennia dinamichnikh rezhimiv roboti elektroprivodnykh vidtsentrovnykh nasosnykh agregativ za dopomogoiu ikhnykh komp'uterno-orientovanykh Bond Graph

modelei [Investigation of dynamic modes of operation of electric centrifugal pump units using their computer-oriented Bond Graph models]. *Visnik Vinnits'kogo politekhnichnogo institutu – Visnyk of Vinnytsia Polytechnical Institute*, 2012, № 2, pp. 148-153. (Ukr.)

18. Kostishin V.S. *Modeliuvannia rezhimiv roboti vidtsentrovikh nasosiv na osnovi elektrogidravlichnoï analogii*. Diss. dokt. techn. nauk [Modeling of operation modes of centrifugal pumps based on electrohydraulic analogy. Doct. tech. sci. diss.]. Ivano-Frankivsk, 2003. 342 p. (Ukr.)

Рецензент: М.Б. Сабат
канд. техн. наук, доцент, НУ «Львівська політехніка»

Стаття надійшла 15.11.2021

ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА

УДК 662.612

doi: 10.32782/2225-6733.44.2022.5

© Хаджинов Є.О.¹, Хаджинов О.С.²**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ГОРІННЯ
ОДИНОЧНИХ ВУГЛЕЦЕВИХ ЧАСТИНОК
В СЕРЕДОВИЩАХ O₂/H₂O ТА O₂/N₂O**

Розглянуто можливість використання кінозйомки як методу дослідження процесу горіння одиночних частинок вуглецю. Розроблено і побудовано експериментальну установку, яка відрізняється від існуючих простотою її монтажу і проведенням експериментів. Проведено експериментальні дослідження процесу горіння частинок графіту в середовищах O₂/H₂O і O₂/N₂ при наступних параметрах: фракційний діапазон часток 0,16-2 мм, температура в реакційній зоні 900-1150°C, концентрація кисню в суміші 43-100%. Показано вплив концентрації парів води в суміші на питому швидкість протікання процесу горіння. Показано, що заміна інертного газу (N₂) в окислювальній атмосфері на H₂O призводить до інтенсифікації реакції і збільшення реакційної здатності палива. Експериментально встановлено, що відносна реакційна здатність графіту в середовищі O₂/H₂O на 19% вище, ніж в середовищі O₂/N₂.

Ключові слова: парокиснева газифікація, реакційна здатність твердого палива, одиночна частка, швидкість горіння.

Y.A. Khadzhyonov, O.S. Khadzhyonov. Experimental study of the combustion of single carbon particles in the atmospheres O₂/H₂O and O₂/N₂O. A research method of single carbon particles combustion process has been developed using high-speed filming. A new experimental device has been designed and built, easy to setup and run, which makes it possible to measure the combustion time of a fuel particle lying at the bottom of the reactor and blown by a gas flow. An experimental research of combustion processes of graphite particles was carried out in O₂/N₂ and O₂/H₂O atmospheres using following parameters: fractional range 0,16-2 mm particles, the temperature in the reaction zone was 900-1150°C, the concentration of oxygen in the mixture was 43-100%. The studies were carried out at gas flow rates that do not affect the combustion rate of the particle, with a completely sufficient amount of oxygen in terms of balance for complete combustion, based on the initial mass of the particle. The experimental results show the effect of water vapor concentration in the mixture at a specific combustion rate. It has been shown that replacing the inert gas in an oxidizing atmosphere with H₂O leads to the process intensification and increases relative reactive capacity of fuel. There relative reactivity of graphite to be up to 19% higher in the O₂/H₂O environment than in the O₂/N₂ atmospheres. The influence of concentration of O₂ on the rate is the liquidity of combustion in the oxidative sum of O₂/H₂O is of a small linear nature and is especially strongly manifested at fractions less than 0.3 mm. On big fractions (> 1 mm) it is very faintly visible.

Keywords: steam-oxygen gasification, reactivity of solid fuel, single particle, combustion rate.

¹magictp, evgen.visi@gmail.com

² канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро

Постановка проблеми. Нині дедалі ширшого поширення набувають процеси газифікації твердого палива, насамперед вугілля. Основою будь-якого твердого палива є вуглець. Як газифікуючий агент застосовуються кисень і суміші кисню з парами води або двоокисом вуглецю.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Результати низки дослідників вказують на залежність швидкості газифікації частинок твердого палива за допомогою O_2 , H_2O та CO_2 від хімічного складу вихідної сировини [1-3]. Ці експериментальні дослідження, як і більшість інших, в основному проводилися за низьких температур, щоб позбутися впливу дифузійних процесів. Таким чином, переважна більшість досліджень газифікації частинок твердого палива проводилася за умови суто кінетичного режиму горіння. Згідно даних [4, 8], практично всі реальні процеси газифікації вугільного палива, що протікають при високих температурах, лімітуються тільки масообмінними процесами на поверхні частки палива і не залежать від кінетичної константи швидкості. Тому для опису реальних високотемпературних процесів доводиться покладатися на апроксимацію отриманих даних і сподіватися на достовірність отриманих результатів.

В даний час існує безліч даних щодо газифікації різних видів твердого палива в середовищах O_2 , CO_2 та їх сумішей. Останні дослідження горіння частинок твердого палива в середовищі O_2/CO_2 , проведені Левендісом, Хатамі, Бежерано та ін., показали, що заміна азоту вуглекислим газом призводить до зниження температури поверхні частинок, що горять, і уповільнення реакції [6, 7]. Ряд інших, більше ранніх досліджень більш-менш підтверджують ці результати. Однак експериментальних даних щодо взаємодії твердого палива із сумішами O_2/H_2O практично немає. Теоретично реакції взаємодії вуглецю з CO_2 і H_2O протікають за схожим механізмом [8], що дозволяє припустити, що швидкість реакції та реакційна здатність палива в цих середовищах буде однаковою. Дане припущення вимагає експериментального підтвердження чи спростування.

Мета статті – проведення експериментальних досліджень взаємодії вуглецевих частинок із середовищем O_2/H_2O , виявлення загальних закономірностей та впливу парів води на підсумкову швидкість перебігу реакції та реакційну здатність твердого палива.

Виклад основного матеріалу. Для вирішення поставленої задачі була модифікована розроблена раніше установка [9]. Вона дозволяє вимірювати час згоряння частки палива, що лежить на дні реактора, і потоку газу, що обдувається. В експериментах температура реактора і газу підтримувалася постійною і могла задаватися в діапазоні від 1073 до 1523 К. Для контролю часу згоряння використовувався оптичний метод дослідження, який полягає в швидкісній фотозйомці частки палива в процесі горіння. Схему експериментальної установки представлено на рис. 1.

Реактор у вигляді пробірки з хімічно та термічно стійкого матеріалу (до 2300 К) поміщений вертикально у робочу камеру трубчастої лабораторної печі. Регулювання температури печі здійснювалося плавним регулюванням напруги електричного джерела живлення. Це дозволило підтримувати температуру у реакторі з похибкою трохи більше $5^\circ C$. Вимірювання температури здійснюється за допомогою каліброваної платино-платинородієвої термопари, введеної в трубчасту піч максимально близько до зони протікання реакції, як показано на рис. 1. Вільні кінці термопари підключені до автоматичного потенціометра, що дозволяє безперервно контролювати температуру в ході експерименту. У робочій камері печі підтримувалася певна окисна атмосфера, що досягалося за рахунок її гарної герметизації. Підведення окисної суміші в робочий простір печі здійснюється знизу через трубку з кварцового скла.

Одиночна частка вкидалася в реактор через отвір у верхній частині. Подача окислювальної суміші в реактор здійснювалася через спеціально прорізаний бічний отвір в нижній частині реактора, розміром 2×5 мм. Спостереження за палаючою частинкою та фотозйомка велася зверху. Фотокамера та пірометр закріплювалися над піччю на координатнику, що дозволяє регулювати відстань від об'єктива до об'єкта.

Відеозйомка процесу горіння за допомогою камери з макрооб'єктивом проводилася з частотою 50 кадрів/с. Отримані відеофайли розбивалися на кадри та оброблялися на комп'ютері. За початок процесу горіння приймався момент, коли частка починала світитися на тлі денця реактора, що означало розвиток автотермічного розігріву частки. В процесі розігріву частки при

температурах 500-750°C спостерігалось горіння летких компонентів і потім починалось горіння коксового залишку. Закінченням процесу горіння вважався момент повного згорання частки.

Дослідження проводили на фракціях: 1,6-2,0; 1,0-1,2; 0,8-1; 0,315-0,5; 0,2-0,25 та 0,16-0,2 мм. Для усунення впливу розкиду розмірів частинки кожної фракції проводилося 30 дослідів, після чого результати піддавалися статистичній обробці. При цьому відносно середньоквадратичне відхилення результату вимірювання часу горіння частки не перевищувало 3%.

Вимірювання проведені на газових сумішах O_2/N_2 (повітря), O_2/H_2O (26% та 47% об'ємних H_2O) та чистому кисні. Витрата кисню та повітря вимірювалася за допомогою ротаметрів. Отримання суміші O_2/H_2O здійснювалося в термостаті, який підтримував задану температуру з точністю 1 К. Кисень з балона підводився в колбу з підігрітою дистильованою водою, де він насичувався парами води в потрібній пропорції, і потім отримана суміш по газопроводу, що обігривається, подавалася в робочий проміжок. Нагріта до заданої температури печі газова суміш через отвір в реакторі направлялася на частинку палива. Контроль співвідношення O_2/H_2O здійснюється за температурою води у колбі термостата.

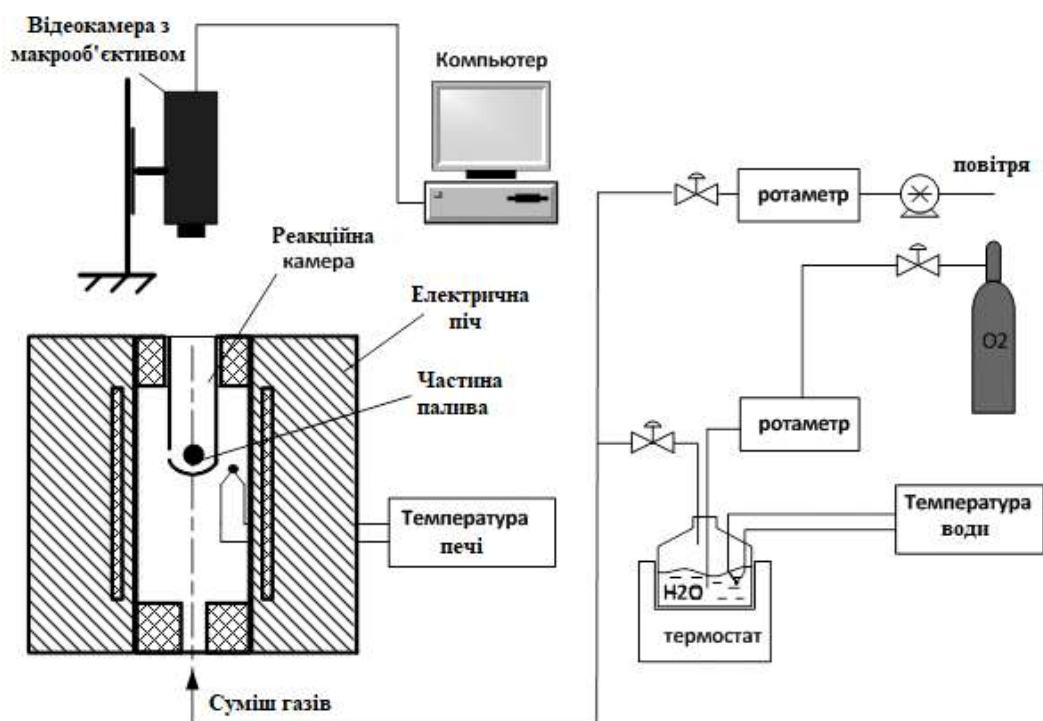


Рис. 1 – Схема експериментальної установки для дослідження кінетики згорання одиночних частинок твердого палива

Дослідження проводилися при швидкостях газового потоку, що не впливають на швидкість горіння частки, причому достатньої кількості кисню по балансу для повного згорання. На підставі результатів цілого ряду експериментальних досліджень як авторів даної роботи, так і результатів інших дослідників [5], було встановлено, що при числах Рейнольдса, менших за 1, коефіцієнт Нуссельта, що характеризує масообмінні процеси, не залежить від швидкості газового потоку і дорівнює 2. При $1 < Re < 10$ залежність Nu від Re має слабо виражений характер. У наших експериментах витрата окислювача в робочу камеру печі підбиралася таким чином, щоб розрахункове число Re було < 5 . У той же час витрата окислювача має бути достатньо великою для забезпечення повного згорання палива з надлишком. Відсутність впливу витрати окислювача на швидкість вигорання частинок графіту в робочому діапазоні витрат експериментально підтверджено для частинок розміром від 0,16 до 2 мм. Зі зростанням $Re > 10$ час згорання частинок зменшувався.

Дані за питомою швидкістю згорання одиночних частинок графіту були отримані при згоранні частинок у суміші H_2O та O_2 з об'ємним вмістом O_2 у діапазоні 53-100 %. Розмір фрак-

цій графітових частинок змінювався від 0,16 до 2 мм. Вплив діаметра частинок на питому швидкість згоряння представлено рис. 2.

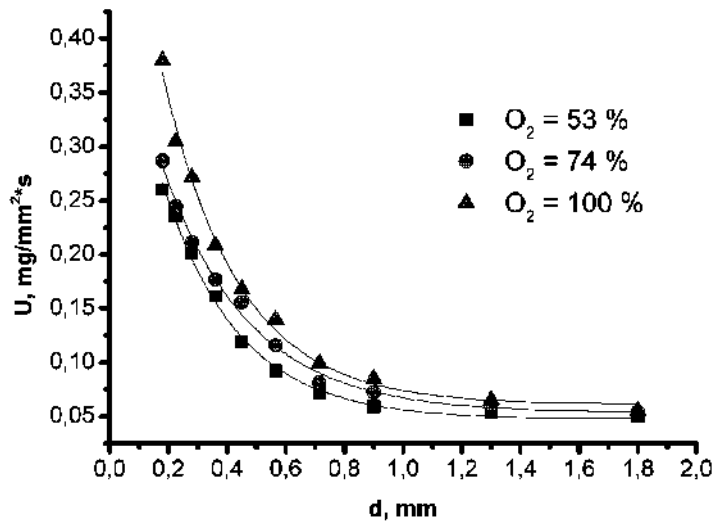


Рис. 2 – Залежність питомої швидкості згоряння частинок графіту серед O₂/H₂O від розміру часток

Отримані дані щодо питомої швидкості згоряння були апроксимовані за допомогою статеchnої функції. Значення середньої питомої швидкості згоряння частки за період горіння, приведені до одиниці поверхні, визначалося за такою формулою

$$U = \frac{m}{F \cdot \tau}, \frac{мг}{мм^2 \cdot с}, \quad (1)$$

де $m = \frac{\pi \cdot d^3}{6}$ – маса частки цієї фракції, мг; d – початковий діаметр частинки, мм; F – середня площа поверхні сферичної частки даної фракції у період горіння, мм²; τ – середній час згоряння частки цієї фракції, с.

Площа F визначалася як середня арифметична між F_{нач} і F_{кінц}, де $F_{нач} = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$, а F_{кінц} = 0.

Вплив концентрації O₂ в окислювальній суміші особливо сильно проявляється на фракціях менших, ніж 0,3 мм. На великих фракціях (> 1 мм) воно слабо відчутно. Загалом, як видно з рис. 3, залежність питомої швидкості згоряння від концентрації O₂ в газовій фазі носить лінійний характер, що говорить про перший порядок реакції [5]. Авторами [8] також було виявлено, що газифікація вугілля паром розвивається, як реакція першого порядку.

Групою вчених ВТІ ім. Дзержинського під керівництвом В.І. Бабія при обробці експериментальних даних було встановлено, що час вигорання коксового залишку частинок пилу вугілля різних марок при горінні їх у дифузійному режимі та при малих швидкостях обдування (Re < 1) може бути розраховано за єдиним рівнянням [4]:

$$\tau = k \cdot 2,21 \cdot 10^8 \cdot \frac{100 - A}{100} \cdot \frac{\rho \cdot d^2}{T_G^{0,9} \cdot O_2}, \quad (2)$$

де τ – час горіння коксового залишку, с; k – експериментальний коефіцієнт, що характеризує специфіку вигорання частинок вугілля цієї марки; A – внутрішня зольність коксового залишку, %; O₂ – об'ємна концентрація кисню, %; T_G – температура газової фази, К; ρ – густина коксового залишку, кг/м³; d – початковий діаметр частинки, мм.

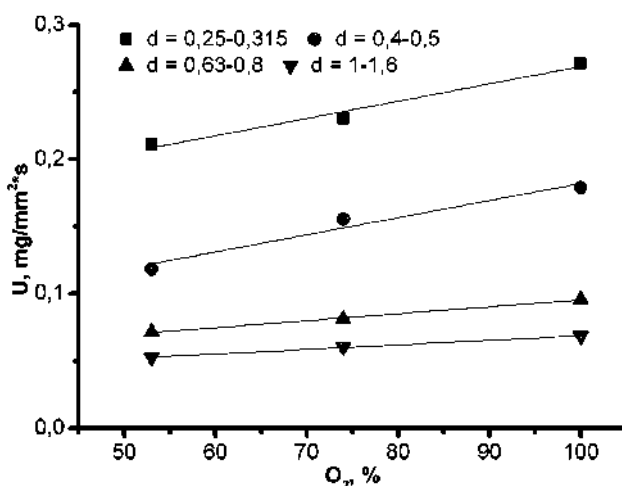


Рис. 3 – Залежність питомої швидкості згоряння частинок графіту серед O_2/H_2O від концентрації O_2 в суміші

Отримані дані за часом згоряння частинок графіту серед O_2/H_2O були оброблені за допомогою вищенаведеного рівняння (2). Теоретично передбачити значення коефіцієнта k важко. Найбільш надійним є визначення його експериментальним шляхом. Обробка великої кількості експериментальних даних різних дослідників показала, що значення k можна прийняти постійним для вугілля кожної марки при широкому варіюванні розмірів частинок (від 20 до 1000 мкм) та параметрів газового середовища в інтервалі $T_r = 1200-1700$ К, $O_2 = 5-100\%$. Авторами [4] було показано, що значення k для вугілля різних марок змінюється від 0,5 до 2,5.

По куту нахилу прямої, що екстраполює отримані дані, було визначено кількісне значення k для електродного графіту в середовищі O_2/H_2O – 1,53. Значення k для графіту серед O_2/N_2 дорівнювало 1,88. Отже можна дійти невтішного висновку, що відносна реакційна здатність графіту серед O_2/H_2O на 19 % вище, ніж серед O_2/N_2 . Це показує, що заміна азоту на водяну пару в окислювальній суміші призводить до збільшення реакційної здатності палива.

Висновки

У ході роботи було освоєно метод дослідження процесу горіння одиночних частинок вуглецю за допомогою кінозйомки. Розроблено та побудовано експериментальну установку, що відрізняється від існуючих простотою її збору та проведенням експериментів.

Вперше були проведені експериментальні дослідження процесу горіння частинок графіту в середовищі O_2/H_2O за наступними параметрами: фракційний діапазон частинок – 0,16-2 мм, температура в реакційній зоні – 900-1150°C, концентрація кисню в суміші – 43-100%. Проведені дослідження показали наступне:

1. Заміна інертного газу в окисній атмосфері на H_2O призводить до інтенсифікації реакції та збільшення реакційної здатності палива. Експериментально встановлено, що відносна реакційна здатність графіту серед O_2/H_2O на 19% вище, ніж серед O_2/N_2 .

2. Вплив концентрації O_2 на питому швидкість згоряння в окислювальній суміші O_2/H_2O має лінійний характер і особливо сильно проявляється на фракціях менше 0,3 мм. На великих фракціях (> 1 мм) воно слабо відчутно.

3. Режим горіння частинок графіту в середовищі O_2/H_2O в умовах експерименту, як і в середовищі O_2/N_2 , був дифузійним або близьким до нього.

Перелік використаних джерел:

- Jenkins R.G. Reactivity of heat-treated coals in air at 500°C / R.G. Jenkins, S.P. Nandi, P.L. Walker Jr. // Fuel. – 1973. – Vol. 52, iss. 4. – Pp. 288-293. – Mode of access: [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(73\)90059-8](https://doi.org/10.1016/0016-2361(73)90059-8).
- Linares-Solano A. Reactivity of heat-treated coals in steam / A. Linares-Solano, O.P. Mahajan, P.L. Walker Jr. // Fuel. – 1979. – Vol. 58, iss. 5. – Pp. 327-332. – Mode of access: [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(79\)90148-0](https://doi.org/10.1016/0016-2361(79)90148-0).

3. Hippo E. Reactivity of heat-treated coals in carbon dioxide 900°C / E. Hippo, P.L. Walker Jr. // *Fuel*. – 1975. – Vol. 54, iss. 4. – Pp. 245-248. – Mode of access: [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(75\)90037-X](https://doi.org/10.1016/0016-2361(75)90037-X).
4. Бабий В.И. Горение угольной пыли и расчёт пылеугольного факела / В.И. Бабий, Ю.Ф. Куваев. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 208 с.
5. Bejarano P.A. Single coal particle combustion in O₂/N₂ and O₂/CO₂ environments / P.A. Bejarano, Y.A. Levendis // *Combustion and Flame*. – Vol. 153, iss. 1-2. – 2008. – Pp. 270-287. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2007.10.022>.
6. Combustion behavior of singles particles from three different coal ranks and sugar cane bagasse in O₂/N₂ and O₂/CO₂ atmospheres / R. Khtami, C. Stivers, K. Joshi, Y.A. Levendis, A.F. Sarofim // *Combustion and Flame*. – Vol. 159, iss. 3. – 2012. – Pp. 1253-1271. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2011.09.009>.
7. Есин О.А. Физическая химия пирометаллургических процессов: в 2 т. Часть 1. Реакции между газообразными и твердыми фазами / О.А. Есин, П.В. Гельд. – М.: Metallurgizdat, 1950. – 511 с.
8. Канторович Б.В. Основы теории горения и газификации твердого топлива / Б.В. Канторович. – М.: Изд. Академии наук СССР, 1958. – 600 с.
9. Хаджинов Е.А. Экспериментальное исследование кинетики сгорания одиночных угольных частиц / Е.А. Хаджинов, Б.И. Бондаренко // *Вісник Приазовського державного технічного університету : зб. наукових праць / ПДТУ*. – Маріуполь, 2013. – Вип. 26. – С. 121-128. – (Серія : Технічні науки).

References:

1. Jenkins R.G., Nandi S.P., Walker Jr. P.L. Reactivity of heat-treated coals in air at 500°C, *Fuel*, 1973, vol. 52, iss. 4, pp. 288-293. doi: 10.1016/0016-2361(73)90059-8.
2. Linares-Solano A., Mahajan O.P., Walker Jr. P.L. Reactivity of heat-treated coals in steam. *Fuel*, 1979, vol. 58, iss. 5, pp. 327-332. doi: 10.1016/0016-2361(79)90148-0.
3. Hippo E., Walker Jr. P.L. Reactivity of heat-treated coals in carbon dioxide 900°C. *Fuel*, 1975, vol. 54, iss. 4, pp. 245-248. doi: 10.1016/0016-2361(75)90037-X.
4. Babii V.I., Kuvaev Iu.F. *Gorenie ugol'noi pyli i raschet pyleugol'nogo fakela* [Combustion of coal dust and calculation of a pulverized coal flame]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 208 p. (Rus.)
5. Bejarano P.A., Levendis Y.A. Single coal particle combustion in O₂/N₂ and O₂/CO₂ environments. *Combustion and Flame*, vol. 153, iss. 1-2, 2008, pp. 270-287. doi: 10.1016/j.combustflame.2007.10.022.
6. Khtami R., Stivers C., Joshi K., Levendis Y.A., Sarofim A.F. Combustion behavior of singles particles from three different coal ranks and sugar cane bagasse in O₂/N₂ and O₂/CO₂ atmospheres. *Combustion and Flame*, vol. 159, iss. 3, 2012, pp. 1253-1271. doi: 10.1016/j.combustflame.2011.09.009.
7. Esin O.A., Gel'd P.V. *Fizicheskaiia khimiia pirometallurgicheskikh protsessov: v 2 t. Chast' 1. Reaktsii mezhdru gazoobraznymi i tverdymi fazami* [Physical chemistry of pyrometallurgical processes: in 2 volumes. Part 1. Reactions between gaseous and solid phases]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1950. 511 p. (Rus.)
8. Kantorovich B.V. *Osnovy teorii goreniiia i gazifikatsii tverdogo topliva* [Fundamentals of the theory of combustion and gasification of solid fuels]. Moscow, Akademiia nauk SSSR Publ., 1958. 600 p. (Rus.)
9. Khadzhinov E.A., Bondarenko B.I. Eksperimental'noe issledovanie kinetiki sgoraniia odinocnykh ugol'nykh chastits [Experimental study of the kinetics of combustion of single coal particles]. *Visnik Priazovskogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu. Seriia : Tekhnichni nauki – Reporter of the Priazovskiy State Technical University. Section: Technical sciences*, vol. 26, pp. 121-128. (Rus.)

Рецензент: В.А. Маслов

д-р техн. наук, проф., ГБУЗ «ПГТУ»

Стаття надійшла 19.10.2021

183 ТЕХНОЛОГІЯ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

УДК 628.4.034

doi: 10.32782/2225-6733.44.2022.6

© Волошин В.С.*

ЧИ ВАРТО ШУКАТИ «ЗОЛОТІ ПРОПОРЦІЇ» ФІБОНАЧЧІ В ПРОЦЕСАХ УТВОРЕННЯ ВІДХОДІВ

Робиться спроба пов'язати закономірності появи відходів в технологічних процесах із закономірностями відомої «золотої пропорції» Леонардо Фібоначчі, як системи оптимального розподілу енергії між її членами, і, враховуючи умови порівняльності між рівноправними членами в основній формулі ряду Фібоначчі, ввести в їх співвідношення умови оптимального осмисленого порівняння енергії, як основу для використання числа $F = 1,618$ або пов'язаних із ним з семантичного розширення концептуального змісту ряду Фібоначчі, що показано в роботі. Були упорядковані інші варіанти аналогової серії Фібоначчі для їх порівняльності з пропорціями між основними матеріальними компонентами типового технологічного процесу. Ряд прикладів реальних технологічних процесів показує різні співвідношення між числовими значеннями компонентів основних матеріальних та інших складових технологічного процесу: сировини, енергії, інформації, виробів і відходів, упорядкованих в залежності від відносності зміни їх ентропії в самому технологічному процесі. Показано, що відсутність таких пропорцій, в тому числі і як показник мінімального утворення відходів, має своє коріння в досліджуваному принципі термодинамічної двоєдності між компонентами сировини і енергією, що використовується в системі. Показано, що основою для появи в матеріальних потоках технологічного процесу відносин, близьких до числа Фібоначчі або аналогічних до нього залежностей у відповідному ряду, може бути лише подолання існування принципу термодинамічної двоєдності в технологічному процесі.

Ключові слова: промислові відходи, система виробництва, числа Фібоначчі, золота пропорція, утворення мінімальних відходів, термодинамічна рівновага, термодинамічна двоєдність.

V.S. Voloshyn. Should we look for Fibonacci's «golden ratio» in the processes of waste formation. We are making an attempt to introduce the regularity of the appearance of waste in technological processes with the regularities of the well-known «golden ratio» of Leonardo Fibonacci. In this case, they are represented by a system of optimal energy distribution between the material components of the production system. The relationship between equal terms in the basic Formula of Fibonacci and components with optimal comparison of energy, as the basis for applying the number $F = 1,618$ or related to it in semantic expansion. Other variants of analog Fibonacci series are ordered in order to compare them with the proportions of the main material flows in a typical technological process. Various correlations between the numerical values of the main material and other components: raw materials, energy, information, products and waste, depending on their attitude to the change in their mutual entropy in a variety of technological processes, are shown. We have shown that the absence of such proportions, including indicators of minimal waste generation, has its roots in the principle of thermodynamic duality between the components of raw materials and the energy that is used in the system. We have shown that

* д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, rektor2591@gmail.com

the basis for the appearance in the material flows of the technological process of relations close to the number of Fibonacci or its analogues can only be the overcoming of the existence of the principle of thermodynamic duality.

Key words: industrial waste, production system, Fibonacci numbers, golden ratio, generation of minimal waste, thermodynamic equilibrium, thermodynamic duality.

Постановка проблеми. Все, що пов'язано з «золотою пропорцією» Фібоначчі, повинно мати свою логіку прагнення до досконалості. Принаймні, багато вчених інтерпретують цю залежність від середньовіччя до наших днів [1-3]. У популярній і навіть науковій літературі вона майже завжди абсолютизується, вважаючи «золоту пропорцію» найбільш гармонійним поєднанням форми, розміру, руху, вкладаючи в неї значення універсальності для самих різних систем: в живопису, архітектурі, в числових і геометричних фігурах, в русі океанічних хвиль і планет, в фізіології людини і найпотаємніших шарах квантової фізики і нейробиології. Було б неправильно не намагатися «перевірити гармонію алгеброю» щодо величезної різноманітності штучних технологій, створених протягом століть людиною, зокрема, в тій їх частині, яка ніким не спростовується як об'єктивна реальність, а саме в пропорціях системи р&w («продукція – відхід»), розуміючи, що, можливо, існує оптимальне співвідношення між обсягом виробленого корисного продукту та об'ємом отриманих відходів. Таке дослідження могло б наблизити нас до розуміння сенсу мінімально можливого рівня утворення відходів в технологічних процесах, якщо такі залежності існують в природі, а також до семантичного розуміння термінів «безвідходні» і «мало-відходні» технології.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наближенням до істини, в даному випадку, можуть бути області будь-якої кількісної рівноваги, наприклад, баланс пропорцій, і взагалі рівноважний стан систем – геометричні, вагові, термодинамічні.

В першу чергу ми дотримуємося логіки тих творів, які не абсолютизують все, що пов'язано з «золотою пропорцією» та іншими «аналогами» ряду Фібоначчі в природі, архітектурі, антропології, образотворчому мистецтві [1-5]. Це дозволяє позбавитися від помилок або неточності в результатах і більш якісно інтерпретувати властивості таких послідовностей, яких, як відомо, крім ряду Фібоначчі, багато, наприклад, роботи [6-8].

Загальна формула послідовності, яка, зокрема, носить назву ряду Фібоначчі (позначається тут як FS – Fibonacci Series або Fibonacci Sequence, як і кому це буде зручно) має вигляд

$$X_i = \sum_{n=1}^N X_{i-n}. \quad (1)$$

Словосполучення «зокрема» тут вживається тільки тому, що послідовні ряди, в яких кожен наступний термін залежить від значень попередніх, існують в певній множині і не тільки до рядів Фібоначчі. Тут X_{i-n} – послідовність членів ряду, що попередують розрахованому X_i -ому; n – порядковий номер попереднього члена, включеного до суми для обчислення розміру нового i -го члену; N – розмірність суми членів для підрахунку чисел шуканого ряду.

Зрозуміло, що для ФС завжди $N = 2$. Але й тільки. Існують варіанти рядів, де $N > 2$. Задача також тривіальна, але вона дозволяє визначити деякі властивості таких нових рядів, які можуть стати в нагоді в прикладних дослідженнях. Тільки вже називати їх на честь Леонарда Фібоначчі можна з певною часткою уяви.

Але й сама ознака додавання у формулі (1) також не може претендувати на абсолютність в таких послідовностях. Інтерес представляють деякі інші «об'єднання» попередніх членів для визначення кожного наступного.

Мета роботи – зробити спробу об'єднати або знайти об'єднуючі зв'язки між значенням послідовності членів «золотої пропорції» і розумінням теоретичного мінімуму утворення відходів в процесах управління і мінімізації відходів у виробничих системах.

Виклад основного матеріалу. Є деякі дивовижні властивості цих послідовностей, включаючи FS, які зазвичай не беруться до уваги, хоча ці властивості емпірично використовуються в багатьох додатках.

1. Одна з основних, на думку автора, властивостей чисел у рядах типу FS, на які посилаються у відомій літературі, мабуть, полягає в оптимальній взаємній енергетичній залежності параметрів об'єктів, які позначаються членами FS: вони пов'язані мінімальною ентропією при

енергетичному обміні між об'єктами, формами, які позначені зв'язаними числами за правилом цього ряду. У літературі можна прочитати, що «золота пропорція» у вигляді FS є формою, що забезпечує розвиток процесів, позначених числами заданої послідовності, саме енергетично найменш витратним способом [3, 7, 8]. Правда, поки що це положення не має строгих доказів і підтверджується лише деякою практикою. Проте ця властивість успішно використовується.

2. Не менш важливою властивістю, характерною для ряду типу FS, є безперервність залежності властивостей кожного наступного члена ряду від властивостей двох його попередніх членів [6, 8], якщо кожен наступний член ряду має фізичний або інший зміст, узгоджений із попередніми. Для прикладних задач це може мати особливе значення. Властивості кожного i -го члена FS, X_i , повинні відповідати властивостям тих попередніх членів X_{i-1} і X_{i-2} , з яких складається це число, якими б не були ці властивості. Це теж гіпотеза, але, як і перша властивість, вона може мати право на існування і має безліч практичних підтверджень.

Цю властивість можна назвати об'єднанням характеристик об'єктів, які підкоряються правилам FS. Точніше було б приписати кожному наступному члену X_i таких рядів у вигляді об'єднання деякого n -ого числа попередніх членів за аналогічними для FS умовами, зокрема, зі збереженням властивостей попередніх членів X_{i-n} об'єднання з затребуваним цим наступним X_i , щоб

$$X_i = \cup_{n=1}^N X_{i-n}. \quad (2)$$

При цьому під знаком об'єднання може бути не тільки додавання членів, їх накопичення, як в ряду Фібоначчі, але і їх множення, можливо, піднесення до ступеня. Специфіку таких рядів, зокрема, спадкоємність властивостей для кожного з членів ряду, буде збережено. Звичайно, не всі подібні ряди мають свій математичний зміст, що збігається з фізичним змістом аналогів такого ряду. Проте такі залежності не варто скидати з рахунків при вирішенні прикладних завдань.

3. Ще одна властивість, що пов'язана з FS, є наявність кореневого механізму для запуску рядів, аналогічних FS (рис. 1). Наприклад, при $N = 2$ кореневий механізм послідовності штучно містить всього два числа, що дорівнюють «0» і «1». Всі наступні числа з ряду визначаються вже за формулою (1) шляхом підсумовування двох попередніх. Для такого числового ряду, як відомо, $\varphi(2) = \Phi \rightarrow 1,618$. Загальне правило полягає в тому, що із збільшенням значення порядкових номерів чисел в послідовності, число Фібоначчі починається з $\varphi = 2$ і далі $\Phi = \varphi(2) \rightarrow 1,618$. Якби не $\varphi = 1,5$ число між членами з $i = 3$ і $i = 4$. Далі, коли $i > 4$ число Φ стає передбачувано близьким до відомого значення 1,618.

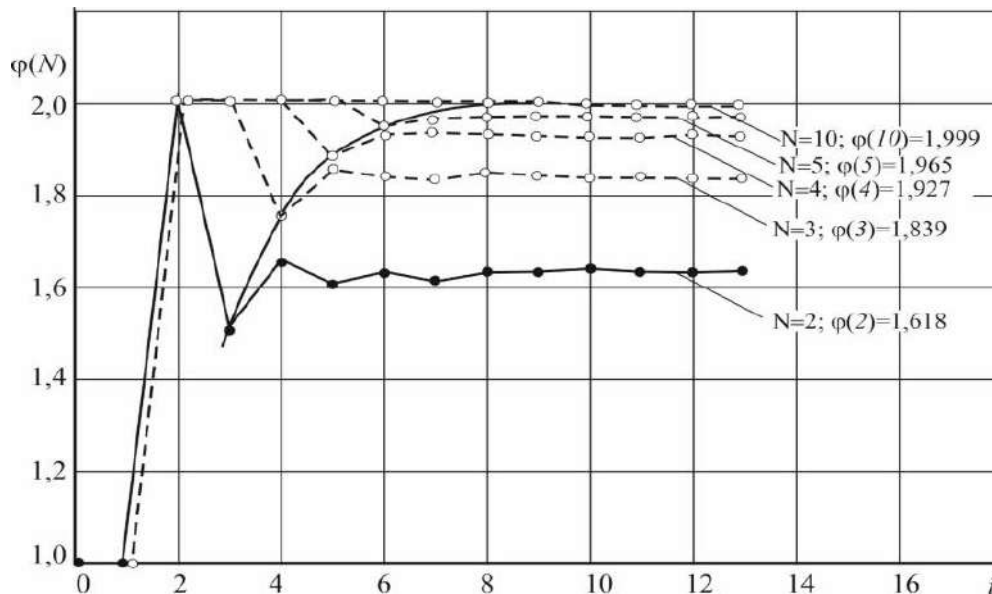


Рис. 1 – Коренева властивість запуску для FS і всіх його аналогів

При $N = 3$ кореневий механізм містить вже два числа, що дорівнюють «0», і одне число, рівне «1». І надалі всі наступні члени розраховуються за формулою (1). Кореневий механізм пов'язаний з аномальними значеннями самого числа Фібоначчі, що дорівнює $\varphi(3) = 1,839$. При $N = 4$ в кореновому механізмі ряду вже три числа, що дорівнюють «0», і одне число, рівне «1», а потім все за порядком формули (1). Але відношення наступних членів до попереднього дорівнює $\varphi(4) = 1,927$. І так далі, в напрямку $\varphi(N \rightarrow \infty) \rightarrow 2,0$.

Побудуємо умовні ряди Фібоначчі для $N = 2, N = 3, N = 4$ і $N = 5$ (таблиця 1). Традиційно позначимо число Фібоначчі як (Φ) , а його аналоги $N > 2$ як (φ) .

Таблиця 1

Умовні ряди, аналоги FS і відповідні їм – число Фібоначчі (Φ) і його аналоги (φ) для $N > 2$

	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}
$N=2$	0	1	1	2	3	5	8	13	21	34	55	89	144	233
$\Phi(2)$			1	2	1,5	1,666	1,6	1,625	1,615	1,619	1,617	1,618	1,618	1,618
$N=3$	0	1	1	2	4	7	13	24	44	81	149	274	504	927
$\varphi(3)$			1	2	2	1,75	1,857	1,846	1,833	1,841	1,839	1,839	1,839	1,839
$N=4$	0	1	1	2	4	8	15	29	56	108	208	401	773	1490
$\varphi(4)$			1	2	2	2	1,875	1,933	1,931	1,929	1,926	1,927	1,927	1,927
$N=5$	0	1	1	2	4	8	16	31	61	120	236	464	912	1793
$\varphi(5)$			1	2	2	2	2	1,938	1,968	1,967	1,967	1,967	1,966	1,966

Ця властивість, як показав В. Кучин в своїх пірамідах [6], може відображати кумулятивний (за властивостями) характер наступних членів аналогів FS по відношенню до попередніх. Кожен наступний член такого ряду за прямим призначенням акумулює властивості кожного з N запрограмованих попередніх, а так як можна припустити, що цією властивістю володіють і попередні члени ряду, то FS і його аналоги виступають системними закономірностями кумулятивних властивостей, що притаманні властивостям самого ряду.

Будь-яке накопичення в будь-якій системі – це збільшення, послідовне доповнення, навіть множення, наприклад, для деяких прогресій. Те ж саме стосується і рядів-аналогів FS.

При цьому виникає питання: властивості якої частини членів рядів-аналогів FS накопичує кожен наступний член ряду? Наприклад, кожен наступний член FS накопичує якості двох попередніх. Але для FS аналогових рядів з $N \gg 2$ ці залежності можуть бути більш складними, з математичним доведенням того, що будь-який i -й член ряду містить сліди властивостей попередніх, включаючи навіть властивості найпершого члена.

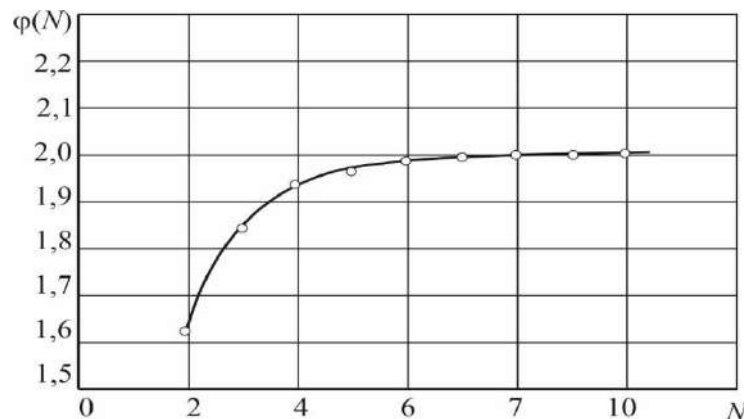


Рис. 2 – Залежність числа Фібоначчі для аналогової серії FS від порядкового числа N його інтегровних членів

Відоме число Фібоначчі $\Phi = 1,618$. Воно відповідає порядку суми накопичення $N = 2$. Зі збільшенням $N > 2$ аналогів числа Фібоначчі вони мають стійку тенденцію до залежності своїх аналогів: $\varphi \rightarrow 2$ (рис. 2). Правда, це вже не зовсім числа Фібоначчі, але, згідно з традицією, вони можуть використовуватися під цією назвою з відповідним індексом $\varphi(N)$. Зокрема, саме число

Фібоначчі можна записати так, як це $F(2) = 1,618$ і означає, що сума кожного наступного члена FS набирається з двох попередніх членів. А позначення $\varphi(5) = 1,966$ (див. рис. 2) позначає число, аналогічне числу Ф таке, що сума кожного наступного члену ряду отримується з п'яти його попередніх членів, а відношення кожного наступного члена до попереднього з ряду вже буде дорівнює 1,966. З ростом значення N , число Фібоначчі асимптотично наближається до значення $\varphi(N \rightarrow \infty) = 2,0$.

Розглянемо ці особливості таких рядів на прикладі процесів утворення відходів у всьому різноманітті виробничих систем і технологічних процесів, спрямованих на отримання товарної продукції і супутніх відходів.

У прикладному аспекті нас можуть зацікавити тільки члени такого ряду з накопичувальним об'ємом $N \geq 2$ одиниць. Тобто системи, в яких кожен член послідовності числового ряду, який вони позначають, складається з числа попередніх членів числом N , яке збігається з кількістю об'єктів, що належать до системи. А їх числове значення, наприклад, може відображати компонентність матеріальних потоків або кількісну масову характеристику, або інше.

Для системи «рzw» (продукт-відходи) моделі-аналоги FS застосовуються саме з позицій послідовності накопичення результатів, наприклад, коли із загальної номенклатури компонентів сировини (S) одна їх частина отримує якість товару (P), а інша частина – якість непотрібного продукту (O) [9]. Для такої моделі кожний наступний член ряду може бути представлений вихідною багатокомпонентною сировиною. Наприклад, у випадку з FS компоненти сировини збігаються з числом $N = 2$ з формули (1). Тоді властивості сировини є відображенням наступного члена FS X_i , співпадають з властивостями попередніх членів, тобто компонентів, позначених як X_{i-1} і X_{i-2} , кожен з яких в силу закладених правил і технологій перетворюється або в продукт, або у відхід. З такого числового ряду практично завжди можна виділити комбінації, відповідні багатокомпонентній сировині для будь-якого технологічного процесу. Саме тут має значення параметр $N > 2$, розмір якого повинен відповідати кількості складових матеріальних потоків, що беруть участь в технологічному процесі.

Ще одним варіантом складових для таких випадків можна прийняти кількість видів матеріальних потоків, які супроводжують дану виробничу систему. До таких складових відносяться:

- сировинна база технологічного процесу (позначається як S);
- виробнича база технологічного процесу (P);
- база відходів (O);
- джерела енергії (E);
- інформація всіх видів, яка забезпечує власне технологічний процес (I).

Якщо кожному з цих потоків присвоїти деяку відповідність числовому ряду, який побудований відповідним чином, і позначити цей ряд як умову мінімізації опосередованих змін для всіх матеріальних потоків, можна отримати умовну послідовність типу

S; P; O; E; I.

Ця послідовність повинна мати своє логічне значення, як числові значення параметрів відповідних матеріальних потоків, а, в ідеальному випадку, повинна бути порівнянна з деякою групою чисел відповідного аналога FS. Судячи з першої з властивостей, про які ми згадували раніше, то для такої послідовності чисел при відображенні матеріальних потоків можливо виконати умову послідовного мінімуму ентропії в напрямку від попереднього члена ряду до наступного.

Ще раз підкреслимо, що дана закономірність носить характер гіпотези і, можливо, зможе мати докази на прикладах таких систем, як «рzw», якій присвячена ця робота. В якості числових значень членів ряду можна взяти їх компонентний склад, як елементи відповідного матеріального потоку, або його масове значення. Також можливі похідні від зміни ентропії системи або окремих її членів, що особливо важливе, якщо враховувати роль ентропійних процесів в системах утворення відходів [9].

Безумовно, мінімальна зміна ентропії відноситься до інформаційного потоку (I). Максимум – до непідготовленої сировини (S). Виробництво (P) є найбільш якісним, з точки зору перетворення енергії, процесом на відміну від виробництва відходів (O) [9], а тому в числовому ряду

має бути вище за якістю споживаної для цього енергії. При таких умовах числовий ряд, відповідний розподіленню матеріально-інформаційним потокам в порядку зростання ентропії, виглядає наступним чином:

$$I; E; P; O; S. \tag{3}$$

Але навіть поза аргументом на користь оптимального енергетичного співвідношення в таких системах, нам може допомогти властивість послідовного накопичення кожним членом досліджуваного ряду якостей його попередніх членів.

Присвоїмо йому властивості аналога ряду Фібоначчі для $N = 4$. Тобто кожен наступний член ряду складається з суми чотирьох, що обліковуються за попередньою формулою (1). При цьому стан матеріального балансу в конкретному технологічному процесі, тобто $x_5 = x_4 + x_3 + x_2 + x_1$ повинен бути дотриманий. У нашому випадку це співвідношення $S = O + P + E + I$. Як впливає з головного правила рядів-аналогів FS:

$$\begin{cases} x_2 = \varphi(4) \cdot x_1 \\ x_3 = \varphi(4)x_2 = \varphi(4)^2 \cdot x_1 \\ x_4 = \varphi(4)x_3 = \varphi(4)^3 \cdot x_1 \\ x_5 = \varphi(4)x_4 = \varphi(4)^4 \cdot x_1 \end{cases} \tag{4}$$

Складемо формалізовану таблицю членів такого ряду і спробуємо визначити деякі його властивості, які можуть виявитися корисними в даному дослідженні (табл. 2).

Таблиця 2

Деякі ряди чисел, аналоги FS по відношенню до умов виробничих систем (за виразами (4))

	Інформація, +I (x_1)	Енергія, +E (x_2)	Продукція, +P (x_3)	Відход, +O (x_4)	Сировина, =S (x_5)
$\Phi(2)=1,618;$ $(x_5 = x_4 + x_3)$	-	-	+1	+1,618	=2,618
$\varphi(3)=1,899;$ $(x_5 = x_4 + x_3 + x_2)$	-	+1	+1,839	+3,381	=6,219
$\varphi(4)=1,928;$ $(x_5 = x_4 + x_3 + x_2 + x_1)$	+1	+1,928	+3,717	+7,167	=13,817

Тут $\varphi(3)=1,839$ відноситься до аналізу матеріальних потоків, а $\varphi(4)=1,928$ відноситься до аналізу як матеріальних, так і інформаційних потоків.

Що стосується реальних матеріальних потоків конкретних галузей, то порівняння числових рядів типу (3) представлено в табл. 3. При найбільш загальному розгляді очевидно, що немає тісного зв'язку ряду послідовності типу (3) з рядами-аналогами FS. Розкид даних свідчить про неправильність таких порівнянь і складає неприйнятні від 62% до 269% по всіх числах ряду, і від 76% до 227%, по ряду $\frac{O/S}{x_2/x_4}$ та $\frac{O/S}{x_4/x_5}$, що показує, яка частина відходів належить до сировини.

Таблиця 3

Порівняльні значення ряду-аналога FS для $N = 3$ в залежності від змін зростання ентропії кожної матеріальної складової для деяких технологічних процесів

Характер виробництва↓	Відносність зміни ентропії для кожної складової матеріального потоку, долі одиниці.			
	Енергія,+E, $(\pm\Delta_{откл}^E, \%)$	Продукція,+P, $(\pm\Delta_{откл}^P, \%)$	Відход,+O, $(\pm\Delta_{откл}^O, \%)$	Сировина,=S, $(\pm\Delta_{откл}^S, \%)$
Вид матеріального потоку→ $\varphi(3)=1,899;$ (E+P+O = S)→	+1	+1,839	+3,381	=6,219
Витоки параметру→	геор. (x_1/x_4)	(x_2/x_4)	(x_3/x_4)	(x_4/x_4)
	факт. $\Delta(\delta s_E)/\Delta(\delta s_S)$	$\Delta(\delta s_E)/\Delta(\delta s_S)$	$\Delta(\delta s_E)/\Delta(\delta s_S)$	$\Delta(\delta s_E)/\Delta(\delta s_S)$

Продовження таблиці 3

Характер виробництва↓		Відносність зміни ентропії для кожної складової матеріального потоку, долі одиниці.			
Вид матеріального потоку→		Енергія,+E, (±Δ _{откл.} ^E %)	Вид матеріального потоку→	Енергія,+E, (±Δ _{откл.} ^E %)	Вид матеріального потоку→
Виробництво сталі	теор.	0,161	+0,295	+0,543	=1,0
	факт.	4311/6248=0,69 (+328%)	4854/6248=0,777 (+163%)	2049/6248=0,328 (-65,5%)	6248/6248=1,0 (0%)
Виробництво чавуну	теор.	0,161	+0,295	+0,543	=1,0
	факт.	3872/12024=0,3 (+86,3%)	5867/12024=0,49 (+66,1%)	6144/12024=0,511 (-6,3%)	12024/12024=1,0 (0%)
Виробництво зернової муки	теор.	0,161	+0,295	+0,543	=1,0
	факт.	94,6/485=0,195 (+21,1%)	144,9/484,7=0,29 (+1,3%)	217,6/484,7=0,449 (-20,9%)	484,7/484,7=1,0 (0%)
Виробництво цементу	теор.	0,161	+0,295	+0,543	=1,0
	факт.	947/4761=0,199 (+23,6%)	2632/4761=0,553 (+87,5%)	2290/4761=0,481 (-12,9)	4671/4761=1,0 (0)
Виробництво вогнеруку	теор.	0,161	+0,295	+0,543	=1,0
	факт.	596/3119=0,191 (+18,6%)	1032/3119=0,331 (+12,2%)	1504/3119=0,481 (-6,2%)	3119/3119=1,0 (0)
Будівництво дорожн.полотна	теор.	0,161	+0,295	+0,543	=1,0
	факт.	2977/9452=0,315 (+95,7%)	5822/9452=0,616 (+108,8%)	4641/9452=0,491 (-10,5%)	9452/9452=1,0
Випічка хлібо-булочних виробів	теор.	0,161	+0,295	+0,543	=1,0
	факт.	30,7/221=0,139 (-15,9%)	77,1/221=0,349 (+18,3%)	104,3/221=0,472 (-15,0%)	221/221=1,0 (0)

У цьому порівнянні цікавим є співвідношення виду (O/S) для систем «р&w» (виробництво-відходи) і умовного числа-аналога Фібоначчі, наприклад, ($\varphi(2/4) = x_2/x_4$). Співвідношення $\frac{O/S}{x_2/x_4} > 1$, за логікою, свідчить про надмірне утворення відходів в тій чи іншій системі, і, навпаки, $\frac{O/S}{x_2/x_4} < 1$ свідчить про цілком прийнятну витрату сировини в технологічному процесі. Значення $\frac{O/S}{x_2/x_4} \rightarrow \min$ може означати наближення до теоретичного мінімуму в процесі відходоутворення.

Очевидно, що в більшості випадків порівняння розглянутих параметрів на відповідність рядам-аналогам FS далеко не зовсім вдале. За невеликим винятком теоретично обґрунтовані значення коефіцієнтів-аналогів числа Фібоначчі, не збігаються, а розбіжність досягає десятків відсотків. Проте загальна закономірність для окремих технологічних процесів, наприклад, для технологій виробництва муки, хлібобулочних виробів, вогнеруку та ін., може бути очевидною, хоча і не універсальною. Супротив технологіям металургійного виробу, дорожнього полотна та ін.

Може бути зацікавою поведінка параметрів, в даному випадку, кількісні значення відходів в порівнянні з сировинною базою і з виробництвом готової продукції з точки зору стану конкретної технології в кількісних показниках ряду Фібоначчі. Як приклад, показаний матеріальний баланс опосередованої конверторної плавки у співвідношенні до однакових показників для технологій виробництв борошна (табл. 4). Для уточнення: технологією виробництва борошна передбачається процес зберігання зерна, його підтримка (сушка, суспензія, очищення зерна, сегрегація, структурний аналіз), підготовка до подрібнення (формування помольних партій зерна), помол зерна (одноразовий і повторюваний) на валкових машинах.

Таблиця 4

Серединний матеріальний баланс плавки конвертера та виробництва борошна, приведених до 1 тони відповідної сировини, та розрахункові дані щодо доведення $\varphi(3)$ -пропорцій

Виробництво сталі				Борошномельне виробництво			
Прибуткова частина балансу, на одиницю сировини		$\Delta(\delta s)10^4$ кДж/кг*К		Прибуткова частина балансу, на одиницю сировини		$\Delta(\delta s)10^4$ кДж/кг*К	
СИРОВИНА, у т. ч.		1,000		СИРОВИНА, у т. ч.		1,000	8,613
1	чавун рідкий	0,719	10,101	1	Сире зерно	0,78	8,349
2	металевий брухт	0,218	4,992	2	Зерно-бове насіння	0,14	8,41
4	Лайм	0,053	1,41	3	Вода кондиційна	0,08	1,264
5	феросплави та лігатура	0,0075	3,772	$\sum [S \cdot \Delta(\delta s)]$		7,79074 · 10 ⁴	
7	шлак мік-сера	0,00016	14,542	ВІДХОДИ, (O) у т. ч:		0,172	0,099
6	накип металобрухту на стінках	0,00145	21,05	1	Домішки і відходи зернових і бур'янів	0,014	1,389
8	Забруднення металобрухту	0,0015	31,823	3	Втрати на фасування борошна	0,03	3,964
$\sum [S \cdot \Delta(\delta s)]$		8,486 · 10⁴		2	Борошняний пил і кормове борошно	0,014	7,112
ВІДХОДИ, (O) у т. ч:		0,33521	29,278	4	Висівки	0,09	0,641
				5	Полова	0,021	2,95
1	Конвертерн. шлак, у т.ч. додатково: металеві корольки - гарнісаж конвертерн.-	0,2254	44,293	6	Втрати від псування зерна через кліматичні та сезонні умови	0,09	47,247
		0,0065	23,337				
		0,0020	27,451				
2	конвертерні гази	0,03071	31,296	7	Відходи полови	0,003	0,064
3	Конвертерний пил	0,0441	24,719	8	Металева доміш	0,000003	0,095
4	виброси та видал. металу	0,006	8,177	$\sum [O \cdot \Delta(\delta s)]$		4,60996 · 10 ⁴	
5	металл. корольки в шлаці	0,0095	23,337	ПРОДУКЦІЯ, у т. ч.		0,828	

Продовження таблиці 4

Виробництво сталі				Борошномельне виробництво					
Прибуткова частина балансу, на одиницю сировини		$\Delta(\delta s)10^4$ кДж/кг*К		Прибуткова частина балансу, на одиницю сировини		$\Delta(\delta s)10^4$ кДж/кг*К			
6	гарнісаж конертерний в шлаці	0,011	23,835	1	Борошно сортове	0,738			
ВСЬОГО:		1,0988		2	Крупка, дунсти для переробки.	0,09			
$\sum [O \cdot \Delta(\delta s)]$		12,7741 · 10⁴		$\sum [P \cdot \Delta(\delta s)]$		3,9773 · 10 ⁴			
ПРОДУКЦІЯ, (P) у т.ч.:		0,8634	$\Delta(\delta s) \cdot 10^4*$	ЕНЕРГІЯ в перерахунку на · 10 ⁴ кВт*ч/кг сировини		0,0834	0,049		
1	Рідкий метал	0,8634	4,444	1	Теплова	0,0618	9,149		
$\sum [P \cdot \Delta(\delta s)]$		3,837 · 10⁴		2	Механічна (ударна та фрікційна)	0,0216	3,112		
ЕНЕРГІЯ, E у т.ч.:		0,0988	0,46	$\sum [E \cdot \Delta(\delta s)]$		0,632627 · 10 ⁴			
1	Кисень наддув.	0,0646	0,45	ВСЬОГО:		1,0834			
2	Електрика забезпечення	0,0342	0,01						
$\sum [E \cdot \Delta(\delta s)]$		0,0294 · 10⁴							
ВСЬОГО:		1,0988							
Розрахункові дані									
1	O/S	0,3351	P/S	0,8634	1	O/S	0,172	P/S	0,828
2	$(\frac{O/S}{x_2/x_4})^{**}$	0,182	$(\frac{P/S}{x_3/x_4})^{***}$	0,2554	2	$(\frac{O/S}{x_2/x_4})^{**}$	0,0936	$(\frac{P/S}{x_3/x_4})^{***}$	0,2449

*-одиниця виміру величини значення зміни зростання ентропії компонента кДж/(кг·К)

** - тут значення $\frac{x_2}{x_4} = 1,839$ для умовного числа Фібоначчі $\varphi(3)=1,839$

***-тут значення $\frac{x_3}{x_4} = 3,381$ для умовного числа Фібоначчі $\varphi(3)=1,839$

Нас буде цікавити співвідношення $\frac{O/S}{x_2/x_4}$ для цього виду технологій. Як виходить з табл. 3, це співвідношення відрізняється від теоретичного у $0,295/0,1222=2,4$ рази, що занадто далеко від передбаченого стану. На той же час співвідношення $\frac{P/S}{x_3/x_4} = 0,255$ відрізняється від теоретично можливого у $0,543/0,255=2,12$ рази, що також не відповідає теоретично обґрунтованому рівню.

Розглянемо, як порівнюється такий показник, як $X \cdot \Delta(\delta s)$, що відображає односпрямовані симплекс-приведені зміни ентропії для різних матеріальних потоків з послідовності (3). Тут X - відносний кількісний показник для послідовності матеріальних потоків (3) (табл. 4). Борошномельне виробництво, в даному випадку, розглядається як більш збалансоване за матеріальними потоками і їх енергетичною цінністю для виробництва. Це показує на те, що кількість відходів при даній технології зводиться до мінімуму, по можливості, в деякий ліміт від загального обсягу матеріального ресурсу технології, що змінюється.

Таблиця 5

Порівняльні дані односпрямованих симплекс-заданих змін ентропії для різних матеріальних потоків з послідовності (3)

№№	Виробництво сталі		Борошномельне виробництво	
	1	Сировина, S_1	$8,486 \cdot 10^4$	Сировина, S_2
2	Відходи O_1	$12,774 \cdot 10^4$	Відходи, O_2	$4,60996 \cdot 10^4$
3	Продукція, P_1	$3,837 \cdot 10^4$	Продукція, P_2	$3,9773 \cdot 10^4$
4	Енергія, E_1	$0,294 \cdot 10^4$	Енергія, E_2	$0,632627 \cdot 10^4$

Очевидно, що послідовність $S_2 \rightarrow O_2 \rightarrow P_2 \rightarrow E_2$ більш прийнятна для її опису основною формулою (1) послідовності Фібоначчі (табл. 5). Це не підтримує фактичне число $F=1,618$, тобто ми маємо справу з деяким наближенням до послідовності FS, яке має властивості, викладені вище. Послідовність $S_1 \rightarrow O_1 \rightarrow P_1 \rightarrow E_1$ більш складна і явно не схожа на ряд Фібоначчі в будь-якому з його властивостей. Але в той же час властивості цих чисел дозволяють аналізувати їх з точки зору власне технологічного процесу.

Отримані залежності між односпрямованою симплекс-приведеною зміною ентропії для матеріальних потоків утворення відходів і отриманого корисного продукту, відповідно, дозволяють оцінити їх з позицій принципу термодинамічної подвійності, що описаний в роботі [9], як нерівнозначні на користь технологічного процесу отримання борошна супроти технологічного процесу виробництва сталі. В роботі [9] показано, що завдяки принципу термодинамічної подвійності у виробничій системі створюються умови для окремих, але взаємопов'язаних процесів отримання корисних продуктів і утворення відходів. Отримані дані (див. табл. 4, 5) дозволяють оцінити порівнянність параметрів ряду (3) з пропорціями Фібоначчі не на користь їх сумісності. Причину цього слід визначати в явному дисбалансі показників односпрямованої симплекс-керуваної зміни ентропії для процесів утворення відходів. Вони мають значення суттєво вищі ніж такі самі показники для отримання продукції, при тому що, в чисельному стані, на порядок відрізняються в порівнянні з типовими значеннями термінів ряду Фібоначчі тощо. Можна зробити висновок про надлишок потужностей з утворення відходів для даної технології і запропонувати напрямок мінімізації відходів в сталеплавильному виробництві. Якщо значення утворення відходів досягнуті в межах свого мінімуму, можливі спроби такого порівняння.

Це свідчить про те, що не існує оптимального співвідношення проміж чисельними компонентами різних матеріальних складових технологічного процесу, відповідно до того, як це існує в рядах типу FS. Можна припустити, що тільки мінімізація умов появи цього принципу може в граничному вираженні стати підставою для появи в матеріальних потоках технологічного процесу відносин, близьких до пропорції Фібоначчі, або пов'язаних з нею залежностей у відповідних рядах. Тим не менш, співвідношення $\varphi(N)$ має бути недосяжною метою для кожного технологічного процесу, якщо розцінювати його з позицій співвідношення «р.шв».

Висновки

Таким чином, слід визнати, що аргументів на користь дуже привабливого рішення розглядати числові значення «золотої пропорції», хоча б в деякому наближенні, в якості універсального критерія мінімуму утворення відходів в технологічних процесах не існує. Існуюче різноманіття технологій дає підстави вважати, що для деяких з них співвідношення компонентів сировини, відходів і продуктів, в якійсь послідовності, може наближатися і навіть корелювати з числом Фібоначчі або пов'язаними з ним числами $\varphi(N)$, $N > 2$, але це лише непрямі наближення, що вказують на відсутність точного співвідношення у відповідності «золотій пропорції» як критерію мінімального утворення відходів. Причина цього бачиться в існуванні непохитного принципу термодинамічної дубовності як основи нерівномірного розподілу ентропії в енергетиці технологічних процесів. Цей висновок, хоч б і опосередковано, свідчить про те, що оптимальні енергетично-ентропійні співвідношення для кількості відходів та інших матеріальних потоків не можуть базуватися на правилах «золотої пропорції», як корельованих між собою членів ряду Фібоначчі та його аналогу.

Перелік використаних джерел:

1. Радзюкевич А.В. Красивая сказка о «золотом сечении» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sibdesign.ru/index.php?text=1&razdel=stat&textnew=20030615041954>.
2. Зубов В.П. Архитектурная теория Альберти / В.П. Зубов. – Санкт-Петербург : Алетея, 2001. – 464 с.
3. Тиммердинг Г.Е. Золотое сечение: пер. с нем. / Г.Е. Тиммердинг; под ред. Г. М. Фихтенгольца. – 2-е изд. – М. : КомКнига, 2005. – 88 с.
4. Ермакова С.В. Антропометрический атлас / С.В. Ермакова, Т.П. Подставкаина, А.Н. Строкина. – М.: ВНИИТЭ, 1977. – 138 с.
5. Ле Корбюзье. Модульор / Ле Корбюзье. – М. : Стройиздат, 1976. – 239 с.
6. Кучин В. Пирамида чисел Фибоначчи-Кучина / В. Кучин. – М. : Литагент, 2020. – 179 с.
7. Аракелян Г. Математика и история золотого сечения / Г. Аракелян. – М. : Логос, 2014. – 404 с.
8. Воробьев Н.Н. Числа Фибоначчи / Н.Н. Воробьев. – М. : Наука, 1969. – 112 с.
9. Волошин В.С. Природа отходаобразования / В.С. Волошин. – Мариуполь: Рената, 2007. – 666 с.

References:

1. Radziukevich A.V. *Krasivaia skazka o «zolotom sechenii»* (A beautiful fairy tale about the «golden section») Available at: www.sibdesign.ru/index.php?text=1&razdel=stat&textnew=20030615041954 (accessed 15 February 2022). (Rus.)
2. Zubov V.P. *Arkhitekturnaia teoriia Al'berti* [Alberti's architectural theory]. St. Petersburg, Aleteia Publ., 2001. 464 p. (Rus.)
3. Timmerding G.E. *Zolotoe sechenie* [Golden ratio]. Moscow, KomKniga Publ., 2005. 88 p. (Rus.)
4. Ermakova S.V., Podstavkina T.P., Strokina A.N. *Antropometricheskii atlas* [Anthropometric atlas]. Moscow, VNIITE Publ., 1977. 138 p. (Rus.)
5. Le Korbiuz'e. *Modulor* [Modulator]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1976. 239 p. (Rus.)
6. Kuchin V. *Piramida chisel Fibonachchi-Kuchina* [Pyramid of Fibonacci-Kuchin numbers]. Moscow, Litagent Publ., 2020. 179 p. (Rus.)
7. Arakelian G. *Matematika i istoriia zolotogo secheniia* [Mathematics and history of the golden section]. Moscow, Logos Publ., 2014. 404 p. (Rus.)
8. Vorob'ev N.N. *Chisla Fibonachchi* [Fibonacci numbers]. Moscow, Nauka Publ., 1969. 112 p. (Rus.)
9. Voloshin V.S. *Priroda otkhodoobrazovaniia* [The nature of waste generation]. Mariupol, Renata Publ., 2007. 666 p.

Рецензент: О.А. Хлестова
канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 07.03.2022

УДК 628.16:620.17.3

doi: 10.32782/2225-6733.44.2022.7

© Волошин В.С.*

ДИНАМІЧНА СТІЙКІСТЬ ТА УПРАВЛІННЯ НАДМОЛЕКУЛЯРНИМИ СТРУКТУРАМИ ВОДИ

Кластерна структура води є визнаною основою для вивчення особливих властивостей цієї рідини і, зокрема, при її взаємодії з біологічними системами. Зроблена спроба виявити закономірності появи недовговічних кластерних надмолекулярних

* д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, rektor2591@gmail.com

структур в складі води. Вони визначають її ефективність по відношенню до таких біологічних систем. Їх поява заснована на закономірностях біфуркаційного переходу з подвоєнням кількості взаємопов'язаних молекул H_2O . Це можливо на межі стану хаосу в міжмолекулярних зв'язках з координатами макростану води. Запропоновано застосування принципу І. Пригожина про високоінтенсивні коливання у триатомних структурах. Вони з'являються, незалежно від змін кластерних структур, в триатомних, молекулярних асоціаціях, заснованих на накопиченні внутрішньої енергії для мінімізації дисипативних процесів. Це є основою для організації таких стійких структур з мінімальною зміною ентропії всієї системи. Був використаний алгоритм І. Пригожина щодо розрахунку термодинамічної нестійкості в поведінці триатомних молекул, як метод управління, з залученням індексу оператора Ліувілля і порівнянного з ним критерія стійкості Ляпунова. Були досліджені процеси миттєвої оборотності та стійкості короткоживучих кластерів на основі молекул H_2O в повній відповідності до існуючих положень про динамічні структури води. Показані особливості дії високочастотних випадкових коливань на структури води, що визначають періодичність створення короткоживучих асоціацій в складі цієї рідини. А також показана стабільність таких періодичних процесів в обмежений проміжок часу, як основа для виявлення повторюваних станів системи. Енергетичний взаємозв'язок в таких системах пропонується розглядати як основу для підтримки їх оптимального стану в структурі води. Це також показник її відношення до біологічних систем, які її сприймають.

Ключові слова: управління структурою води, надмолекулярні структури води, біологічні системи, триатомна молекулярна система, кластери, термодинамічна нестійкість, фазові переходи, оператор Ліувілля, критерій стійкості Ляпунова, ентропія.

V.S. Voloshyn. Dynamic stability and control of supermolecular structures of water. The cluster structure of water is a recognized basis for studying the special properties of this liquid and, in particular, when interacting with biological systems. An attempt has been made to identify patterns for the appearance of short-lived cluster supramolecular structures in the composition of water. They determine its effectiveness in relation to such biological systems. Their appearance is based on the patterns of bifurcation transition with a doubling of the number of bound molecules H_2O . This is possible in a border area with chaos in intermolecular of bonds water. The use of I. Prigogine's principle of high-intensity fluctuations is proposed. They appear independently of changes in cluster structures in triatomic molecular associations based on the accumulation of internal energy to minimize dissipative processes. This is the basis for the organization of such stable structures with minimal change in the entropy of the entire system. Prigozhin's algorithm was applied to calculate the thermodynamic instability and behavior of triatomics as a control method. The index of the operator Liouville and the comparable criterion of stability of Lyapunov are involved. The processes of instantaneous reversibility and stability of short-lived clusters based on molecules were investigated, in full accordance with the existing provisions on the dynamic structure of water. The features of the action of high-frequency random oscillations are shown, which determine the periodicity of the creation of short-lived associations in the composition of water. It also shows the stability of such periodic processes in a limited period of time, as a basis for identifying repetitive states of the system. Energy interrelation in such systems is proposed to be considered as the basis to maintain their optimal state in the structure of water. This is also an indicator of its relationship to the perceiving biological systems.

Key words: water structure management, supramolecular water structures, biological systems, triatomic molecular system, clusters, thermodynamic instability, phase transitions, Liouville operator, Lyapunov stability criterion, entropy.

Постановка проблеми. Сучасні уявлення про воду, як джерело життєзабезпечення як людини, так і всього живого на планеті, дозволяють розраховувати на те, що максимально можлива

кількість цього життєвого ресурсу буде спрямована на потреби суспільства. Для цього необхідно навчитися управляти структурними станами води в будь-якому з її джерел і не тільки природних. Такі дослідження можуть наблизити нас до вирішення проблеми забезпечення людства якісною прісною водою не тільки з висотні анклавів, а й з інших доступних джерел.

Мета статті – визначити умови щодо управління короткоживучими кластерними структурами води для додання їй необхідних властивостей корисності для біологічних систем.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Структурні властивості води слід розглядати як один з найважливіших показників її якості, що впливають на біологічні процеси в цілому [1]. Загальновідомі особливості кластерної структури води дозволяють пояснити багато її «аномальних» властивостей, зокрема, узгодження з законами термодинаміки, температурні відхилення для існування багатьох фізико-хімічних параметрів, а також показники впливу на організм людини [2, 3]. Найпростішими відомими людині системами управління водною структурою є фазові переходи стану води через температурні точки плавлення і кипіння, електролітичні методи її структурування та ін. Існують деякі узагальнені підходи до вирішення цієї проблеми, зокрема, в масштабах відомих уявлень про миттєвих у часі кластерних асоціаціях в структурі води [4]. Як показує у своїх дослідженнях І. Пригожин [5], вони можуть базуватися на механізмах коливання міжмолекулярних відносин, зокрема, в єдиній еволюції розподілу ймовірностей миттєвих станів кластерних водних структур на основі квантового рівняння руху Шредінгера для поведінки квантових ОРТО-ПАРА-спінових молекул води.

Матриця щільності будь-якого миттєвого конгломерату надмолекулярних асоціацій, як великої квантової системи Пуанкаре, має свої особливості, а саме:

- суперпозиційна енергетична залежність (яка порівнянна зі структурними коливаннями надмолекулярних водних асоціацій);
- незворотність, що є операторно-незалежною від попередніх станів (що також впливає з вихідної змішаної кластерно-молекулярної моделі С.В. Зеніна [6]);
- відсутність імовірних перетинів імовірнісних станів з областю переходу в хаотичний стан.

Згідно з дослідженнями І. Пригожина [5], саме флуктуація і, особливо, її висока інтенсивність, відповідно до швидкості зміни кластерів в надмолекулярних структурах, *дозволяє не тільки акумулювати внутрішню міжмолекулярну енергію для мінімізації дисипативних процесів, але і енергетично забезпечувати всі структурні перетворення в міжмолекулярних водних асоціаціях таким чином, щоб досягти мінімуму розсіювання енергії для системи в цілому.*

Тоді виникає питання про можливість і механізми управління такими триатомними структурами на прикладі молекул H_2O , в їх відомій кластерній інтерпретації.

Виклад основного матеріалу. Для триатомних структур, схожих на воду, можна виділити три взаємопов'язані складові, що забезпечують синергетичний стані незалежно від її властивостей [5]. Це функції системи, її структура і можливість флуктуації, в основі яких лежать різноманітність надвисокочастотних перетворень (рис. 1). Функції системи виражаються рівняннями динаміки, в яких вона існує. І. Пригожин посилається, як приклад, на хімічні рівняння, хоча, в принципі, такими станами є і дифузійні процеси, і закони великих чисел, і системи, що описуються рівняннями гідродинаміки та ін.

Уявімо в геометричній формі відображення процесу надмолекулярної взаємодії в кластерній моделі води (рис. 2), що отримана за алгоритмом І. Пригожина [5] для триатомних термодинамічно нестійких систем з урахуванням рівняння стійкості, що з'єднує воедино ермітовий L –інваріантний оператор Ліувілля з критерієм стійкості Ляпунова Λ , а саме

$$\Lambda^*(L) = \Lambda^+(-L) . \quad (1)$$

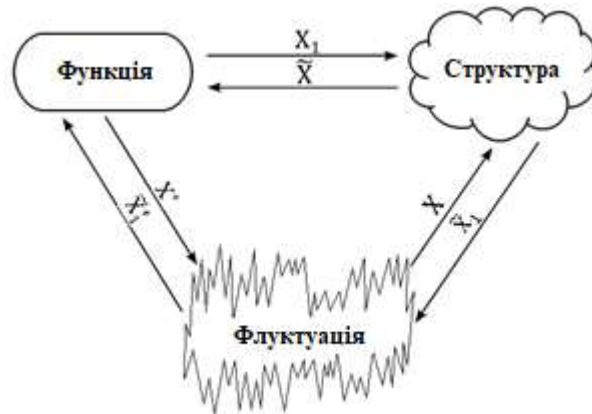


Рис. 1 – Механізм запуску процесів дестабілізації як основа нерівноважності і незворотності у триатомних молекулярних системах [5].

Тут об'єктивно існує фактор оборотності для триатомних структур типу H_2O . У координатах (X_1, X_2) , під якими для випадку води зручно брати, наприклад, її температуру і тиск відповідно, отримуємо дві чітко обмежені області: стійкість і біфуркацію. Точка A^a з координатами (X_1^a, X_2^a) представляється початковим стійким аттрактором, що відображає деякий кінцевий стан в процесі зміни надмолекулярної структури води. Враховуючи, що стабільність такого стану може бути гіпотетичною та лише в нескінченно малий проміжок часу, отже, тому що міжмолекулярна структура води зазнає постійних і миттєвих змін, можна лише умовно позначити цей стан як дане. Для миттєво стабільного стану кластерної структури повинна бути виконана умова його інтегрального енерговитрачання $E = X_1 \cdot X_2 < X_1^a \cdot X_2^a$, як похідна ентропійних змін (див. рис. 2). Кінцевий стан системи апіорі має бути пов'язаний з мінімумом дисипації. Куди потрібно рухатися системі, щоб мати цей стан? Звичайно, до аттрактора A^a , який, в даному випадку, більше схожий на «дивний аттрактор», що з'являється в результаті складних і віддалених від нього біфуркаційних змін, коли починається межа з $E = X_1 \cdot X_2 \geq X_1^a \cdot X_2^a$. При цьому точки A^b, A^c, A^d (див. рис. 2) повинні виконувати роль проміжних аттракторів (від області нестійкості до області стійких надмолекулярних структур), від процесів біфуркації до процесів послідовної передачі властивостей, від однієї структури (читай, кластерів) до іншої, в суворій відповідності з гіпотезою С.В. Зеніна [4, 7].

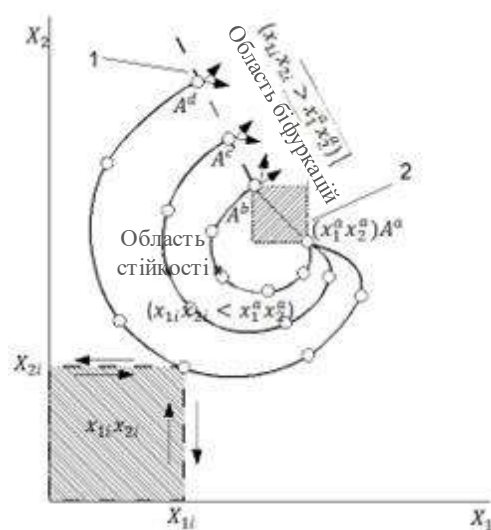


Рис. 2 – Траєкторії еволюції енергоентропійних станів надмолекулярних об'єднань H_2O в параметрах (P, T)

Принаймні, це те, до чого ми прагнемо. І, в кожен наступний момент часу (який, нагадаємо, вимірюється в значеннях $1 \cdot 10^{-15} \div 1 \cdot 10^{-12}$ с) енергоентропійна характеристика системи

прагне до максимального значення для неї $E = X_1 \cdot X_2 \rightarrow X_1^a \cdot X_2^a$, маючи обмеження тільки у вигляді внутрішніх джерел енергії системи. Слід розуміти, що саме тому між точками A^b, A^c, A^d з одного боку і точкою A^a з іншого відбувається впорядкування надмолекулярних структур води до цілком стабільного миттєвого стану. Питання в тому, чи можливий такий стан системи в принципі? Не варто забувати, що до такого висновку ми прийшли, використовуючи штучний поділ траєкторій зміни енергоентропійних станів на передатракторні та на область «дивного аттрактора» (при $\tau \rightarrow 0$), яке не має права на самостійне існування.

Якщо запропонований геометричний опис об'єктивно реальний, можна очікувати, на якомусь етапі траєкторії еволюції водних структур, прояву їх здібностей не тільки до утримання, але і до квантової трансформації, що зафіксовано за допомогою ОРТО-ПАРА-спін-ефектів інформації [8]. Цю, на перший погляд, складну систему синергетичних проявів можна значно спростити, якщо з рівняння для стабільності енергетичного стану коливальної системи з амплітудою C_k такою, що $|C_k \cdot C_k| = C_k \exp(-iE_k\tau) \cdot C_k \exp(+iE_k\tau) = C_k^2$, прийняти умову, що описана як: $|C_k|^2 \neq f(\tau)$. При цьому наше припущення про існування подвійного аттрактора, висловлене раніше, приймає форму визначеності. Наскільки достовірно виглядає стійкість таких областей, можна судити з наступних міркувань.

Ще засновники статистичної фізики Дж. У. Гіббс та Л. Больцман розглядали велику кількість мікрочастинок, атомів, молекул і їх структур, як фазовий простір для дисипативних систем [9, 10]. Вода при різноманітних одночасних фазових станах і траєкторіях їх зміни завжди може відповідати таким системам. М. Дж. Кляйн, посилаючись на П. Еренфеста, показав, що для таких систем спочатку існує тільки одна фазова траєкторія в часі. Вона проходить надзвичайно близько до якоїсь сингулярної точки на енергетичній поверхні системи [11]. Кількісні характеристики таких траєкторій визначаються критеріями стійкості або нестійкості, зокрема, критеріями стійкості руху, введеними математиком А.М. Ляпуновим, який розробив для таких систем, зокрема, критерій КС-ентропії.

Процес взаємного молекулярного обміну в надмолекулярних структурах води може передбачати періодичність флуктуаційних рухів в режимі випадкової частоти як для окремих молекул, так і, зокрема, для надмолекулярних асоціацій. Для нормального періодичного процесу будь-яка зміна параметрів призводить до чітко визначених змін структур, які як би відбуваються в водних кластерах. Для оцінки стійкості таких коливальних процесів в динаміці процесів, які носять чітко визначену назву – випадкові періодичні цикли, скористаємося відомим методом поперечного перерізу Пуанкаре для тривимірного фазового простору [12, 13], коли переріз приймає умовну форму типового двовимірного відображення Пуанкаре

$$x' = f(x, y) \text{ і } y' = \varphi(x, y). \quad (2)$$

Для таких періодичних циклів завжди є хоча б одна фіксована точка відображення (її координати: $x = f(x_0, y_0), y = \varphi(x_0, y_0)$). Координати будь-якої іншої точки на цій поверхні поперечного перерізу можна записати в поточних значеннях \tilde{x} і \tilde{y} , як $x = x_0 + \tilde{x}, y = y_0 + \tilde{y}$. Тоді рівняння відображення Пуанкаре (2) можна розв'язати за допомогою стандартного Якобіана

$$\hat{j} = \begin{pmatrix} f_x(x_0, y_0) & f_y(x_0, y_0) \\ \varphi_x(x_0, y_0) & \varphi_y(x_0, y_0) \end{pmatrix} \quad (3)$$

у вигляді

$$\mu \begin{pmatrix} \tilde{x}_s \\ \tilde{y}_s \end{pmatrix} = \hat{j} \begin{pmatrix} \tilde{x}_s \\ \tilde{y}_s \end{pmatrix} \text{ для } s=1,2 \quad (4)$$

Динамічна стійкість коливальної системи в координатах: слід S і детермінант D матриці Якобі

$$S = f_x(x_0, y_0) + \varphi_y(x_0, y_0) \quad (5)$$

та

$$D = f_x(x_0, y_0) \cdot \varphi_y(x_0, y_0) - f_y(x_0, y_0) \cdot \varphi_x(x_0, y_0) \quad (6)$$

відповідно, визначається з рівняння (4) через мультиплікативне власне число $\mu = \pm 1$, як розв'язок квадратного рівняння

$$\mu^2 - S\mu + D = 0. \tag{7}$$

Межі динамічної стійкості такої системи в координатах (D,S) знаходяться в межах області, обмеженої лініями $1 \pm S + D = 0$ і $D = 1$. Стан системи в межах $\mu > \pm 1$ свідчить про її вихід з області стійкості за межі ліній $1 \pm S + D = 0$ і $D = 1$. Це означає, що при єдиному русі впродовж циклу мультиплікатор змінює знак на протилежний. Але траєкторія руху не буде завершеною. Завершення траєкторії можливе тільки при наявності ще одного повторення циклу. Період траєкторії при цьому подвоюється (рис. 3, а).

Такий сценарій транзитивного хаосу в надмолекулярних асоціаціях, по відношенню до води, можливий тільки при зовнішньому збудженні, наприклад, шляхом зміни якогось параметра $\alpha(x, y)$ цієї системи, внаслідок чого в структурі води відбуваються миттєві зміни форм і станів клатратів, кластерів і їх співвідношення з окремими молекулами H_2O в напрямку їх руйнування (в нашому випадку це параметр, наприклад, температура або тиск у водному середовищі, наявність сторонньої домішки та ін.). Під впливом такого збудження змінюється амплітуда несподіваних сплесків, що відображається на кроці нестабільного циклу (рис. 3, б). Причиною такої зміни може бути лише певна біфуркація негативного мультиплікатора, коли стабільне початкове положення точки відображення $x_0 = f(x_0, y_0)$, $y_0 = \varphi(x_0, y_0)$ дає нестабільний цикл. Це називається біфуркацією подвоєння періоду [14]. Ці результати в достатній мірі співвідносяться з розрахунковими даними, отриманими в роботах І. Пригожина та І. Стінгерса (див. рис. 3).

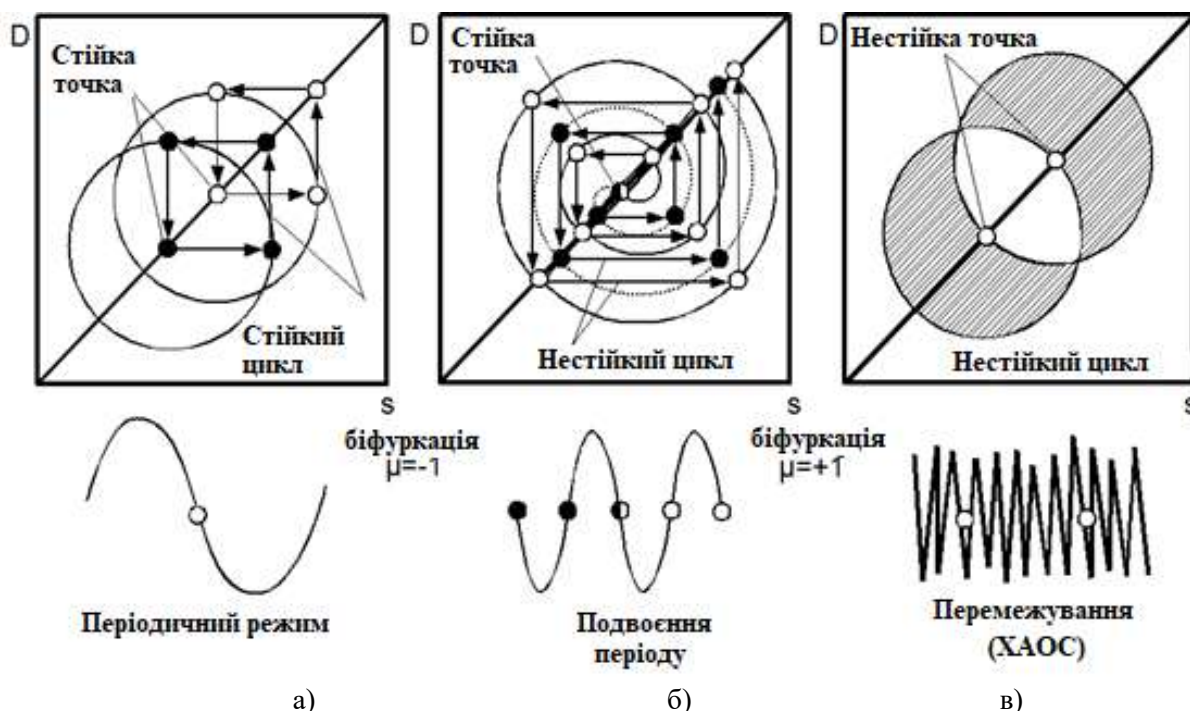


Рис. 3 – Ітераційний варіант сценарію Фейгенбаума щодо процедури біфуркації подвоєння періоду для триатомних молекулярних структур

При подальшій зміні параметра α біфуркаційної системи такого типу її стан повторюються, але з іншим набором молекул і, при найменше, при збереженні інтегральної ентропії системи. І наприкінці, динамічна система переходить до хаотичної переривчастості (рис. 3, в), коли частота подвоєння циклу нескінченно збільшується, а нестабільний цикл вже стає похідною від нестабільної точки перетину з координатами площини відображення Пуанкаре. Це відбувається як результат нескінченної процедури біфуркаційного подвоєння періоду цього циклу. Аналогічний алгоритм переходу від регулярності до хаосу за допомогою біфуркацій, що приводять до

подвоєння періоду, носять назву «сценарія Фейгенбаума» [15]. Такий сценарій сам по собі є підтвердженням взаємообразності кластерних мікросистем води з її квантовою природою і їх загальною енергоентропією.

Модель подвоєння періоду, як відображення перехідних процесів упорядкування у водних структурах, не є єдиною. Динамічний режим надмолекулярних кластерів дуже різноманітний. Численні флуктуації не дозволяють поглянути на таку систему з точки зору спадкоємності станів, наприклад,

$$f(x_{n-1}) \rightarrow f(x_n) \rightarrow f(x_{n+1}). \quad (8)$$

У кожному кластері знаходиться величезна кількість молекул, які здійснюють коливання в чотирьох з половиною ступенях свободи, деякі з них синхронізують свої коливальні рухи, деякі рухаються в протифазі, а ще більше молекул знаходяться в проміжному стані. І все це відбувається за мільярдні частки секунди, після чого структура розпадається, і з'являється нова, така, що енергетично пов'язана з першою. Тому існує висновок, що сценарія Фейгенбаума відносно таких модифікацій явно недостатньо для пояснення вищеописаних процесів. Навряд чи сьогодні можна уявити собі процеси, окреслені на рис. 3, не в двовимірному, а в багатовимірному просторі.

Проте, щоб отримати картину об'єктивних стохастичних процесів в надмолекулярних структурах води, хоча б з метою з'ясування їх здатності до деякої послідовності і керованості, що дозволяло би бачити в ній впорядкованість квантових перетворень, необхідно звернути увагу на їх квантову природу. Зокрема, нас не може не цікавити питання про спадкоємності властивостей окремих кластерів з миттєво сформованою картиною ОРТО(80)-ПАРА(20)-переходів в певній кількості молекул H_2O . Чи може нова структура кластерів мати хоча б частину властивостей свого попередника в кожен наступний момент часу? Відповідь на це питання могла би дати можливість правильно оцінити здатності квантово-механічного підходу до води, як до інформаційного ретранслятора.

Висновки

Стабільний стан кластерних систем H_2O знаходиться в певному проміжку між хаосом і контрольованою ними біфуркацією. Управління такими триатомними молекулярними і короткоживучими надмолекулярними системами можливо, наприклад, в рамках координат (P, T) , що може однозначно вказувати на незмінність взаємних перетворень між узгодженими кластерами. Енергетична живучість і взаємна незворотність таких кластерів дозволяє на основі граничних перетворень, стабільно підтримувати в структурі води її оптимальний стан, наприклад, для біологічних систем, що її сприймають.

Перелік використаних джерел:

1. Волошин В.С. Питьевая вода. Невостребованные требования / В.С. Волошин, В.А. Бурко // Экологична безпека: проблеми і шляхи вирішення: Міжн. наук.-практ. конф. – Харків, 2017. – С. 124-131.
2. Лобышев В.И. Вода как сенсор и преобразователь слабых воздействий физической и химической природы на биологические системы / В.И. Лобышев // Слабые и сверхслабые поля и излучения в биологии и медицине: тезисы II Международного конгресса. – Санкт-Петербург, 2000. – С. 99-100.
3. Калниньш К.К. Каталитические свойства «живой» и «мертвой» воды / К.К. Калниньш, Л.П. Павлова / Слабые и сверхслабые поля и излучения в биологии и медицине: тезисы V Межд. конгресса. – Санкт-Петербург, 2009. – С. 56.
4. Зенин С.В. Исследование структуры воды методом протонного магнитного резонанса / С.В. Зенин // Доклады Академии наук. – 1993. – Т. 332, № 3. – С. 328-329.
5. Пригожин И. Время, хаос, квант / И. Пригожин, И. Стингерс; под ред. В.И. Аршинова. – М. : КомКнига, 2005. – 232 с.
6. Зенин С.В. Структурированное состояние воды как основа управления поведением и безопасностью живых систем : дис. ... д-р биол. наук : 05.26.02 / Зенин Станислав Валентинович. – Москва, 1999. – 208 с.
7. Зенин С.В. Гидрофобная модель структуры ассоциатов молекул воды / С.В. Зенин,

- Б.В. Тяглов // Журнал физической химии. – 1994. – Т. 68, № 4. – С. 636-641.
8. Pershin S.M. Coincidence of rotational energy of H₂O ortho-para molecules and translation energy near specific temperatures in water and ice / S.M. Pershin // *Physics of Wave Phenomena*. – 2008. – Vol. 16(1). – Pp. 15-25. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s11975-008-1003-x>.
 9. Гиббс Дж. В. Термодинамика. Статистическая механика / Дж. В. Гиббс. – М. : Наука, 1982. – 584 с.
 10. Больцман Л. Избранные труды. Часть 1 / Л. Больцман. – М. : Наука, 1984. – 590 с.
 11. Klein M.J. Entropy and the Ehrenfest urn model / M.J. Klein // *Physica*. – 1956. – Iss. 6-12. – Pp. 569-575. – Mode of access: [https://doi.org/10.1016/S0031-8914\(56\)90001-5](https://doi.org/10.1016/S0031-8914(56)90001-5).
 12. Зенин С.В. Водная среда как информационная матрица биологических процессов / С.В. Зенин // *Фундаментальные науки и альтернативная медицина: тезисы докладов I Межд. Симпозиума (22-25 сентября 1997 г.; Пушино)*. – 1997. – С. 12-13.
 13. Кодратьев А.С. Сечение Пуанкаре при описании поведения нелинейных систем / А.С. Кодратьев, А.В. Рябцев // *Компьютерные системы в образовании*. – 2012. – № 1. – С. 38-47.
 14. Кузнецов С.П. Динамический хаос / С.П. Кузнецов. – М. : Физматлит, 2001. – 296 с.
 15. Фейгенбаум М. Универсальность в поведении нелинейных систем / М. Фейгенбаум // *Успехи физических наук*. – 1983. – № 141, том 2. – С. 343-374. – Режим доступа: <https://doi.org/10.3367/UFNr.0141.198310e.0343>.

References:

1. Voloshin V.S., Burko V.A. Pit'evaia voda. Nevostrebouvannye trebovaniia. *Tezi Mizhn. nauk. kong. «Ekologichna bezpeka: problemi i shliakhi virishennia»* [Drinking water. Unclaimed claims. Proceedings of Int. Sci. Conf. «Environmental safety: problems and solutions»]. Kharkiv, 2017, pp. 124-131. (Rus.)
2. Lobyshev V.I. Voda kak sensor i preobrazovatel' slabykh vozdeistvii fizicheskoi i khimicheskoi prirody na biologicheskie sistemy. *Tezi II Mizhn. kong. «Slabye i sverkhslabye polia i izlucheniia v biologii i meditsine»* [Water as a sensor and converter of weak effects of physical and chemical nature on biological systems. Proceedings of II Int. Congress «Weak and superweak fields and radiation in biology and medicine»]. St. Petersburg, 2000, pp. 99-100. (Rus.)
3. Kalnin'sh K.K., Pavlova L.P. Kataliticheskie svoistva «zhivoi» i «mertvoi» vody. *Tezi V Mizhn. kong. «Slabye i sverkhslabye polia i izlucheniia v biologii i meditsine»* [Catalytic properties of «living» and «dead» water. Proceedings of V Int. Congress «Weak and superweak fields and radiation in biology and medicine»]. St. Petersburg, 2009, pp. 56. (Rus.)
4. Zenin S.V. Issledovanie struktury vody metodom protonnogo magnitnogo rezonansa [Investigation of the structure of water by the method of proton magnetic resonance]. *Doklady Akademii nauk – Reports of the Academy of Sciences*, 1993, vol. 332, № 3, pp. 328-329. (Rus.)
5. Prigozhin I., Stingers I. *Vremia, khaos, kvant* [Time, chaos, quantum]. Moscow, KomKniga Publ., 2005. 232 p. (Rus.)
6. Zenin S.V. *Strukturirovannoe sostoianie vody kak osnova upravleniia povedeniem i bezopasnost'iu zhivykh sistem*. Diss. dokt. biol. nauk [The Structured State of Water as a Basis for Controlling the Behavior and Safety of Living Systems. Doct. biol. sci. diss.]. Moscow, 1999. 208 p. (Rus.)
7. Zenin S.V., Tiaglov B.V. Gidrofobnaia model' struktury assotsiatov molekul vody [Hydrophobic model of the structure of associates of water molecules]. *Zhurnal fizicheskoi khimii – Journal of Physical Chemistry*, 1994, vol. 68, № 4, pp. 636-641. (Rus.)
8. Pershin S.M. Coincidence of rotational energy of H₂O ortho-para molecules and translation energy near specific temperatures in water and ice. *Physics of Wave Phenomena*, 2008, vol. 16(1), Pp. 15-25. doi: 10.1007/s11975-008-1003-x.
9. Gibbs Dzh.V. *Termodinamika. Statisticheskaiia mekhanika* [Thermodynamics. Statistical mechanics]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 584 p. (Rus.)
10. Bol'tsman L. *Izbrannye trudy. Chast' I* [Selected works. Part 1]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 590 p. (Rus.)
11. Klein M.J. Entropy and the Ehrenfest urn model. *Physica*, 1956, iss. 6-12, pp. 569-575. doi: 10.1016/S0031-8914(56)90001-5.
12. Zenin S.V. Vodnaia sreda kak informatsionnaia matritsa biologicheskikh protsessov. *Tezi dokladov I Mizhn. simp. «Fundamental'nye nauki i al'ternativnaia meditsina»* [Aquatic environment as an

- information matrix of biological processes. Proceedings of I Int. Simp. «Basic sciences and alternative medicine». Pushchino, 1997, pp. 12-13. (Rus.)
13. Kodrat'ev A.S., Riabtsev A.V. Sechenie Puankare pri opisaniі povedeniia nelineinykh sistem [The Poincare section in describing the behavior of nonlinear systems]. *Komp'iuternye sistemy v obrazovanii – Computer systems in education*, 2012, № 1, pp. 38-47. (Rus.)
 14. Kuznetsov S.P. Dinamicheskii khaos [Dynamic chaos]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2001. 296 p. (Rus.)
 15. Feigenbaum M. Universal'nost' v povedenii nelineinykh sistem [Universality in the behavior of nonlinear systems]. *Uspekhi fizicheskikh nauk – Advances in the physical sciences*, 1983, vol. 141, iss. 2, pp. 343-374. doi: 10.3367/UFNr.0141.198310e.0343. (Rus.)

Рецензент: О.А. Хлестова
канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 30.04.2022

271 РІЧКОВИЙ ТА МОРСЬКИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 621.413.3.436

doi: 10.32782/2225-6733.44.2022.8

© Агєєв М.С.¹, Черненко В.В.²

РОЗРОБКА ТА РЕАЛІЗАЦІЯ КОНЦЕПЦІЇ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЕТАЛЕЙ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ В ПРОЦЕСІ РЕМОНТУ НА БАЗІ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ

Запропоновані основні принципи формування концепції забезпечення надійності відновлюваних деталей засобів транспорту в процесі ремонту, яка відображає функціональні, експлуатаційні, матеріально-технічні та технологічні аспекти ремонту деталей засобів транспорту шляхом використання багатофункціональних покриттів, нанесених за допомогою інтегрованих технологій. Представлено реалізацію концепції забезпечення надійності відновлюваних деталей засобів транспорту, яка полягає в використанні багатофункціональних покриттів, визначенні раціональних режимів комбінованого методу нанесення покриттів та управління ресурсом деталей засобів транспорту на основі впливу факторів управляючої дії. Розроблені основні принципи формування концепції забезпечення надійності відновлюваних деталей засобів транспорту в процесі ремонту, представлена реалізація концепції на базі використання системного підходу, аналізу матеріалів, особливостей конструкцій обладнання, режимів обробки на етапах процесу ремонту, основних статистичних та математичних методах, експериментальних дослідженнях. Науковою основою для раціонального та ефективного досягнення мети дослідження в роботі використано положення системного підходу, а саме сукупність методологічних принципів та положень, що дозволяють розглядати забезпечення надійності засобів транспорту та їх елементів як єдину систему з узгодженням діяльності всіх її підсистем. В основу покладено вивчення кожного елементу системи в його зв'язку і взаємодії з іншими елементами, спостереження за змінами, що проходять у системі, виявлення специфічних системних властивостей, висунення обґрунтованих припущень відносно закономірностей розвитку системи та визначення раціональних режимів її функціонування. Для ефективного вирішення проблеми забезпечення надійності засобів транспорту та їх елементів була виявлена системна взаємодія факторів, що визначають хід процесу відновлення комбінованим методом нанесення багатофункціональних покриттів, у вигляді схеми структурних взаємозв'язків та отримана морфологічна матриця формування процесу ремонту з урахуванням можливих варіантів відновлення деталей засобів транспорту.

Ключові слова: концепція ремонту, системна взаємодія, системний підхід, морфологічна матриця, багатофункціональні покриття, системні властивості, методологічний підхід.

M.S. Ahieiev, V.V. Chernenko. Development and implementation of the concept of ensuring the reliability of recoverable parts of means of transport during the repair process based on a system analysis. The main principles of the formation of the concept of ensuring the reliability of the repairable parts of the means of transport during the repair process are proposed, which reflects the functional, operational, material-technical and technological aspects of the repair of the parts of the means of transport through the use of

¹ д-р техн. наук, доцент, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: 0000-0001-5691-8986, taxageev73-73@ukr.net

² ст. викладач, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: 0000-0001-6639-1102, v.chernenko18@gmail.com

multifunctional coatings applied with the help of integrated technologies. The implementation of the concept of ensuring the reliability of renewable parts of means of transport is presented, which consists in the use of multifunctional coatings, the determination of rational modes of the combined method of applying coatings and resource management of parts of means of transport based on the influence of factors of control action. The main principles of the formation of the concept of ensuring the reliability of the repairable parts of the means of transport during the repair process are developed, the implementation of the concept based on the use of a system approach, analysis of materials, features of equipment structures, processing modes at the stages of the repair process, basic statistical and mathematical methods, experimental results are presented. As a scientific basis for the rational and effective achievement of the research goal, the work uses the provisions of the system approach, namely, a set of methodological principles and provisions that allow us to consider ensuring the reliability of means of transport and their elements as a single system with the coordination of the activities of all its subsystems. The basis is the study of each element of the system in its connection and interaction with other elements, observation of changes taking place in the system, identification of specific system properties, putting forward well-founded assumptions about the patterns of system development and determining rational modes of its functioning. In order to effectively solve the problem of ensuring the reliability of means of transport and their elements, the systemic interaction of factors that determine the course of the restoration process by the combined method of applying multifunctional coatings in the form of a scheme of structural interconnections and the obtained morphological matrix of the formation of the repair process, taking into account possible restoration options, were identified details of means of transport.

Key words: *concept of repair, system interaction, system approach, morphological matrix, multifunctional coatings, system properties, methodological approach.*

Постановка проблеми. Науковою основою для раціонального та ефективного досягнення мети дослідження в роботі використано положення системного підходу, а саме сукупність методологічних принципів та положень, що дозволяють розглядати забезпечення надійності та підвищення ресурсу засобів транспорту (ЗТ) та їх елементів як єдину систему з узгодженням діяльності всіх її підсистем. В основу покладено вивчення кожного елементу системи в його зв'язку і взаємодії з іншими елементами, спостереження за змінами, що проходять у системі, виявлення специфічних системних властивостей, висунення обґрунтованих припущень відносно закономірностей розвитку системи та визначення раціональних режимів її функціонування.

Для ефективного аналізу механізму явищ та управління способом відновлення і підвищення експлуатаційних властивостей конструктивних елементів (КЕ) деталей вузлів та агрегатів ЗТ необхідно виявити взаємозв'язок факторів, що визначають хід процесу відновлення, і представити їх у кількісній формі – в вигляді математичної моделі [1-3]. Модель дозволяє отримати інформацію про процес відновлення, який протікає в об'єкті; розрахувати характеристики об'єкту; отримати інформацію, яку можна використовувати для управління об'єктом, що моделюється [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основним напрямком реалізації концепції забезпечення надійності відновлюваних деталей ЗТ в процесі ремонту та розробці методології синтезу комбінованих багатоопераційних технологій присвячена робота [5]. В роботі доведено, що у комбінації методів відновлення багатофункціональними покриттями переважає емпірично-інтуїтивний підхід. Автори зазначають, що явище інверсії, коли зміна послідовності операцій відновлення шляхом нанесення багатофункціональних покриттів, призводить до результатів, які відрізняються. Оптимальний вибір методів відновлення та їх послідовність визначається підвищенням твердості, комплексу механічних властивостей, зносостійкості, а також шорсткості відновлюваної поверхні і точності розмірів відновлюваної деталі.

Кожний метод відновлення має свою нішу оптимальних умов використання, включаючи навіть технологічні традиції, що склалися на конкретному підприємстві, тому реалізований системний підхід до відновлення деталей ЗТ є вирішальним фактором у виборі первинних методів нанесення багатофункціональних покриттів у комбінованому процесі відновлення і можливість інтегрувати їх у єдиний технологічний цикл [6].

В роботах [7, 8] запропоновано комплексний методологічний підхід до рішення проблеми відновлення зношених поверхонь деталей ЗТ, який дозволяє логічно впорядкувати складні теоретичні та експериментальні дослідження на сумісній методичній інформаційній базі. Також в роботі наведена характеристика установок, матеріалів та методик, що використовуються для експериментальних досліджень.

Методологія науково-експериментальних досліджень призначена для скорочення об'єму експериментальних робіт, отримання максимальної інформації та пропонує використання комплексу експериментально-статистичних та обчислювальних методів досліджень. Ці методи дозволяють визначити оптимальні технологічні режими електродугового напилення (ЕДН), з допомогою яких можна отримати покриття з заданими властивостями та забезпечити оптимальне співвідношення характеристик міцності в композиції «поверхня – покриття», а саме максимальну міцність. Тобто технологію нанесення покриттів ЕДН слід розглядати як спосіб управління властивостями поверхневого шару. При цьому конструювання матеріалу типу «поверхня – покриття» базується не тільки на співвідношенні властивостей покриття з умовами експлуатації, але й на співвідношенні властивостей покриття з властивостями відновлюваної поверхні. В розглянутій роботі розроблена загальна методологія, яка базується на застосуванні системного підходу до рішення наукової проблеми і математичного моделювання процесу ЕДН, з метою вивчення особливостей процесу напилення, встановлення закономірностей впливу параметрів ЕДН на властивості та структуру отриманих покриттів, на вибір оптимальних режимів ЕДН та розробку технологічних процесів (ТП) нанесення ЕДН-покриттів [9].

Спираючись на проведений інформаційний огляд останніх досліджень і публікацій можна сказати, що розробка та реалізація концепції забезпечення надійності відновлюваних деталей засобів транспорту в процесі ремонту на базі системного підходу дозволить встановити структурні зв'язки між теоретичними та експериментальними дослідженнями та скоротити об'єм експериментальних робіт. Концептуально реалізований підхід до ремонтного виробництва дозволить забезпечити надійність ЗТ та їх елементів в процесі ремонту.

Метою дослідження є розробка концепції забезпечення надійності деталей ЗТ та їх елементів в процесі ремонту шляхом використання багатофункціональних покриттів, сформувані основні принципи побудови концепції, реалізувати концепцію на базі використання системного підходу, аналізу матеріалів, особливостей конструкцій обладнання, режимів обробки на етапах процесу ремонту, основних статистичних та математичних методах, експериментальних дослідженнях.

Виклад основного матеріалу. Концепція забезпечення надійності деталей ЗТ в процесі їх ремонту враховує структурні та морфологічні особливості відновлюваної поверхні після електроіскрового легування (ЕІЛ), вплив параметрів ЕДН на якість системи «відновлювана поверхня – покриття» та модифікуючу дію імпульсного іонного азотування (ІА) на напиленні покриття.

Основні принципи формування концепції забезпечення надійності відновлюваних конструктивних елементів деталей ЗТ в процесі ремонту включають функціональні, експлуатаційні, матеріально-технічні та технологічні аспекти ремонту деталей ЗТ комбінованим методом нанесення багатофункціональних покриттів.

Реалізація концепції базується на використанні системного підходу, аналізу матеріалів, особливостей конструкцій обладнання для ЕІЛ, ЕДН і ІА, режимів відновлення шляхом нанесення покриттів і їх обробки на етапах процесу ремонту, основних статистичних та математичних методах, експериментальних дослідженнях.

Формування багатофункціональних покриттів в процесі ремонту базуються на двох комплексних складових: інформаційній (ІС) та науково-технологічній (СТС).

– ІС (ідентифікація елемента ТЗ (VEI), дефектація елемента ТЗ (DDVE), аналіз отриманої інформації (AIR), перевірка відповідності відновленої поверхні процесам ремонту (VCRP), оцінка поверхні після ЕІЛ (ESEA), оцінка поверхні після ЕДН (ESEAS), оцінка поверхні після ІА (ESPIN));

– СТС (вибір способу підготовки відновлюваної поверхні (CSPM), вибір способу нанесення багатофункціонального покриття (CCM), вибір способу підвищення зносостійкості і мікротвердості (SMIRM), ЕІЛ (EA), ЕДН (EAS), ІА (PIN), вибір обладнання для ЕІЛ (SEEA), вибір обладнання для ЕДН (SEEAS), вибір обладнання для ІА (SEPIN), вибір режимів ЕІЛ (SMEA), вибір режимів для ЕДН (SMEAS), вибір режимів для ІА (SMPIN)).

Всі наведені елементи, що забезпечують структуру формування багатфункціональних покриттів, нанесених комбінованим способом, в інформаційній складовій (VEI, DDVE, AIR, VCRP, ESEA, ESEAS, ESPIN) та науково-технологічній складовій (CSPM, CCM, SMIRM, EA, EAS, PIN, SEEA, SEEAS, SEPIN, SMEA, SMEAS, SMPIN) є функціями організації та управління способом відновлення і підвищення експлуатаційних властивостей KE деталей ЗТ в залежності від їх рівнів. Синтез отриманих функцій являє собою функціонал QRS (якісна відновлена поверхня), який характеризує якість відновлюваних поверхонь KE деталей ЗТ або сукупність їх експлуатаційних властивостей, що в подальшому впливає на надійність ЗТ.

$$QRS = F(IC(VEI, DDVE, AIR, VCRP, ESEA, ESEAS, ESPIN); STC(CSPM, CCM, SMIRM, EA, EAS, PIN, SEEA, SEEAS, SEPIN, SMEA, SMEAS, SMPIN))$$

У спрощеній формі функціонал QRS може бути виражений алгебраїчними величинами, що увійшли до нього з урахуванням вагових коефіцієнтів:

$$QRS = K_i \times F = F(K_i \times IC; K_i \times STC),$$

де K_i – вагові коефіцієнти, які виконують роль нормуючих множників, що приводять всі величини у відношеннях до одного порядку

Науковою основою для раціонального та ефективного досягнення мети дослідження в роботі використано системний підхід, а саме сукупність методологічних принципів та положень, що дозволяють розглядати забезпечення надійності та підвищення ресурсу ЗТ та їх елементів як єдину систему з узгодженням діяльності всіх її підсистем (рис. 1).

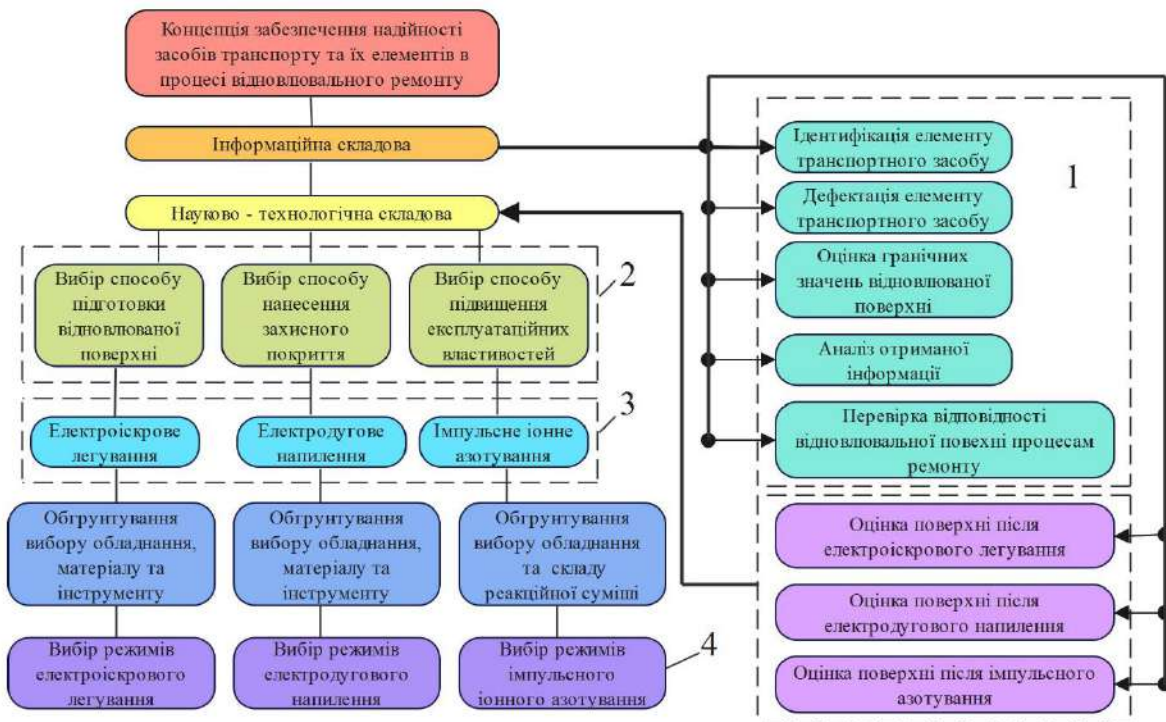


Рис. 1 – Структурна схема формування багатфункціональних покриттів в процесі ремонту деталей ЗТ

Виходячи із системного підходу, організація досліджень представлена у вигляді ієрархічної структури наступних методологічних рівнів:

1 рівень: формалізація проблеми дослідження, що включає, відображення сутності та актуальності проблеми, визначення мети, загальну постановку задачі та шляхів вирішення;

2 рівень: концептуальний рівень дослідження, що вміщує аналіз системного оточення, виділення з нього технологічних процесів відновлення комбінованим методом нанесення багатфункціональних покриттів, який включає електроіскрове легування, електродугове напилення і

імпульсне іонне азотування, та обґрунтування його вибору, що створюють структурно-операційний базис концепцій проведення операції вибору;

3 рівень: операційний рівень дослідження, що припускає проведення функціонально-морфологічного аналізу, визначення показників адгезійної міцності й зносостійкості та вибір за концепцією придатності кращих режимів для створення структурно-функціонального базису системного дослідження ТП відновлення комбінованим методом нанесення багатофункціональних покриттів на детальному рівні й розробку його математичних моделей;

4 рівень: завершальний етап прийняття рішення щодо вибору оптимальних параметрів способу відновлення комбінованим методом нанесення багатофункціональних покриттів, яке дозволить вирішити наукову проблему, яка припускає: аналіз системного оточення й формування множини стратегій вибору, функціонально-морфологічний аналіз і розробку системи показників якості, а також математичні описи й моделювання ТП з метою синтезу розрахункових варіантів і створення механізму вибору кращого з них.

Взаємозв'язок факторів, що визначають хід процесу ремонту, представлений у вигляді структурної схеми формування багатофункціональних покриттів на всіх етапах ремонту КЕ ЗТ (рис. 1).

Системність і комплексний методологічний підхід щодо визначення закономірностей впливу режимів комбінованого способу формування багатофункціональних покриттів, що включає ЕЛ, ЕДН і ПА, на їх фізико-механічні та експлуатаційні властивості, ресурс і надійність дозволяють логічно впорядкувати складні теоретичні і експериментальні дослідження на спільній методично-інформаційній базі. Так, системний підхід щодо визначення закономірностей впливу багатофункціональних покриттів на характеристики міцності зчеплення системи «відновлювана поверхня – покриття» і зносостійкості відновлених поверхонь КЕ деталей ЗТ дозволив створити основу для розробки принципу управління процесом ремонту з метою забезпечення надійності та підвищення ресурсу ЗТ та їх елементів.

Засоби транспорту різного призначення – складна технічна система, яка складається з багатьох модулів, систем, вузлів, агрегатів і окремих КЕ, надійність яких впливає на безпеку їх роботи, тому дослідження представлені єдиною системою, що дало можливість оцінити взаємодію всіх її частин і об'єднати їх на необхідній методологічній основі (рис. 1).

Для ефективного вирішення проблеми забезпечення надійності та підвищення ресурсу ЗТ та їх елементів була виявлена системна взаємодія факторів, що визначають хід процесу відновлення комбінованим методом нанесення багатофункціональних покриттів, які представлені у вигляді схеми системних взаємозв'язків при формуванні процесу ремонту (рис. 2).

Наведений метод полягає в багатоваріантному дослідженні функціонального призначення ТЗ та його елементів з врахуванням умов експлуатації, класифікації деталей, вузлів та агрегатів за конструкторсько-технологічними ознаками, формуванні інтегрованої технології відновлення елементів ТЗ з використанням багатофункціональних покриттів, матеріально-технічної бази та функціонального аспекту ремонтного виробництва, детального аналізу етапів ремонтного процесу.

В морфологічній матриці формування ТП відновлювального ремонту для елемента А визначено чотири основні ознаки, від яких залежить механізм зношування, процеси руйнування поверхні деталей, зміна форми деталі: 1 – функціональне призначення засобів транспорту; 2 – призначення агрегату; 3 – призначення вузлів; 4 – призначення деталей. Для елемента В визначено теж чотири основні ознаки: 1 – навантаження; 2 – агресивне середовище; 3 – похибки складання і монтажу; 4 – експлуатаційні фактори. Елемент С має три основні ознаки: 1 – групи деталей; 2 – представники груп; 3 – відновлювані елементи. Елемент матриці D, який безпосередньо впливає на формування процесу ремонту має чотири ознаки: 1 – способи підготовки відновлюваної поверхні; 2 – способи нанесення покриття; 3 – хіміко-термічні способи; 4 – наплавлення. Для виробничо-технічної бази ремонту (елемент Е) існують наступні чотири основні ознаки: 1 – електроенергія, газ, вода; 2 – розподіл праці; 3 – вибір обладнання; 4 – матеріал для відновлення. Для елемента F виділені наступні три ознаки: 1 – розробка технічної документації; 2 – розробка конструкторської документації; 3 – підготовка виробництва.

A. Функціональне призначення деталей, вузлів та агрегатів засобів транспорту				
1. Функціональне призначення засобів транспорту		2. Призначення агрегату		3. Призначення вузлів
		2.1. Перетворення руху		3.1. Передача енергії
1.1. Вид транспорту	1.2. Вид силового агрегату	2.2. Передача крутного моменту		3.2. Керування
1.1.1. Наземний	1.2.1. ДВЗ	2.3. Газорозподіл		3.3. Накопичення енергії
1.1.2. Повітряний	1.2.2. Електричний	2.4. Перетворення енергії		3.4. Перетворення енергії
1.1.3. Залізничний	1.2.3. Гібридний			3.5. Перетворення руху
1.1.4. Спеціальний	1.2.4. ГТД			4. Призначення деталей
1.1.5. Водний				4.1. Перетворення руху
				4.2. Передача руху
				4.3. Керування
				4.4. Опора
				4.5. Кріплення
B. Врахування умов експлуатації деталей, вузлів та агрегатів засобів транспорту				
5. Навантаження	6. Агресивне середовище	7. Похибки складання і монтажу		8. Експлуатаційні фактори
5.1. Ударні	6.1. Хімічне	7.1. Порушення норм при отриманні заготовки		8.1. Призначення машин
5.2. Розтягнення	6.2. Абразивне	7.2. Порушення норм при складанні та монтажі		8.2. Швидкісний режим
5.3. Стиснення	6.3. Високотемпературне	7.3. Порушення норм при регулюванні		8.3. Режим навантаження
5.4. Крутіння	6.4. Вологе	7.4. Порушення технології термічної обробки		8.4. Інтенсивність експлуатації
5.5. Згин	6.5. Газоподібне	7.5. Порушення норм при випробуванні		8.5. Своєчасність та повнота технічного обслуговування
5.6. Складне	6.6. Комбіноване	7.6. Комбіновані		
C. Класифікація деталей, вузлів та агрегатів засобів транспорту за конструктивно-технологічними ознаками				
9. Групи деталей		10. Представники груп		11. Відновлювані елементи
9.1. Складної конфігурації		10.1. Корпусні		11.1. Посадочні отвори
9.2. Коничні		10.2. Зуб'я шестерень		11.2. Пази, канавки
9.3. Циліндричні		10.3. Вали		11.3. Зуб'я, шліці
9.4. Плоскі		10.4. Диски, пази, канавки		11.4. Поверхні
D. Формування інтегрованої технології відновлення деталей, вузлів та агрегатів засобів транспорту				
12. Способи підготовки поверхні		13. Способи нанесення ЗЗП		14. Хіміко-термічні способи
12.1. Обробка дробом		13.1. Газополум'яне		14.1. Гальванічні покриття
12.2. Обробка піском		13.2. Детонаційне		14.2. Цементация
12.3. Нанесення насічок		13.3. Електродугове		14.3. Борування
12.4. Нарізання різьби		13.4. Плазмове		14.4. Азотування
12.5. Електроіскрове легування				15. Наплавлення
				15.1. Вібродугове
				15.2. Електродугове
				15.3. В середовищі вуглекислого газу
				15.4. Під шаром флюсу
E. Виробничо – технічна база ремонтного виробництва				
16. Електроенергія, газ, вода		17. Розподіл праці		18. Вибір обладнання
16.1. Витрати на підготовку поверхні		17.1. На підготовку обладнання		19. Матеріал для відновлення
16.2. Витрати на процес наплення		17.2. На процес підготовки поверхні		19.1. Матеріали для ЕІЛ
16.3. Витрати на процес азотування		17.3. На процес наплення		18.1. Для ЕІЛ
16.4. Загальні витрати		17.4. На процес азотування		18.2. Для ЕДН
				18.3. Для ПА
				19.2. Матеріали для ЕДН
				19.3. Матеріали для ПА
F. Функціональний аспект ремонтного виробництва				
20. Розробка технічної документації		21. Розробка конструкторської документації		22. Підготовка виробництва
20.1. Технічна пропозиція		21.1. Функціональні вимоги		22.1. Проектування технологічних процесів
20.2. Технічний проект		21.2. Експлуатаційні вимоги		22.2. Розміщення обладнання за технологічним процесом
20.3. Ескізний проект		21.3. Нормативні вимоги		22.3. Вибір технологічного оснащення
20.4. Виготовлення технічної документації для опитного зразка		21.4. Всі вимоги		22.4. Вибір методів контролю виробництва
J. Електроіскрове легування				
23. Інструмент		24. Тип контакту інструменту		25. Матеріал електроду
23.1. Вібратійні збудники		24.1. Детермінантний		26. Параметри процесу
23.2. Багатоелектродні головки		24.2. Статичний		26.1. Імпульс струму
23.3. Електромагнітний збудник		24.3. Змішаний		26.2. Тривалість обробки
23.4. Пневматичний збудник				26.3. Матеріал електроду
				26.4. Сила струму
				26.5. Частота розряду
				26.6. Всі складові
				27. Функціональне призначення
				27.1. Зміцнення та легування поверхні
				27.2. Підвищення зносостійкості
				27.3. Підвищення корозійної стійкості
H. Електродугове наплення				
28. Інструмент		29. Матеріал дроту		30. Параметри процесу
28.1. Ручний стаціонарний		29.1. Аустенітні сталі		31. Функціональне призначення
28.2. Ручний переносний		29.2. Порошковий дріт		30.1. Швидкість розплення
28.3. Автоматичний		29.3. Мартенситні сталі		30.2. Потужність дуги
				30.3. Кількість газу
				30.4. Склад горючої суміші
				30.5. Відстань від сопла до поверхні
				30.6. Всі параметри
				31.1. Забезпечення мінімальної пористості
				31.2. Підвищення зносостійкості
				31.3. Підвищення витривалості на контактні навантаження
				31.4. Підвищення мікротвердості
I. Імпульсне іонне азотування				
32. Параметри процесу		33. Суміш реакційного газу		34. Функціональне призначення
32.1. Час дифузійного насичення		33.1. Аргон+Азот		34.1. Підвищення зносостійкості
32.2. Тиск реактивного газу		33.2. Метан+Азот		34.2. Підвищення мікротвердості
32.3. Склад реакційного газу		33.3. Азот+Метан+Аргон		34.3. Підвищення корозійної стійкості
32.4. Температура газу				34.4. Підвищення несучої здатності
32.5. Всі параметри				34.5. Зниження пластичної деформації
				34.6. Відновлення без деформації і викривлення

Рис. 2 – Морфологічна матриця формування ТП відновлювального ремонту

Для першого етапу ТП відновлювального ремонту (елемент J), від якого залежить адгезійна міцність, насиченість відновлювальної поверхні легованими елементами (корозійна стійкість), зносостійкість визначено наступні ознаки: 1 – інструмент; 2 – тип контакту інструменту з відновлюваною поверхнею; 3 – функціональне призначення ремонтної операції. Нанесення покриття методом ЕДН (елемент Н) є базовою операцією для подальшого ПА та забезпечує одну з основних характеристик, пористість покриття, та має такі ознаки: 1 – інструмент; 2 – матеріал дроту; 3 – параметри процесу; 4 – функціональне призначення ремонтної операції. Для підвищення зносостійкості, мікротвердості, корозійної стійкості, несучої здатності використовується заключна операція ТП відновлювального ремонту ПА (елемент I), для нього визначені наступні ознаки: 1 – параметри процесу; 2 – суміш реакційного газу; 3 – функціональне призначення ремонтної операції.

Для кожної з 34 морфологічних ознак вибрано основні варіанти їх реалізації (від 3 до 6). Зміна конструктивного вираження конкретного варіанту будь-якої з 34 ознак формує нову схему реалізації концепції ремонту елементів ЗТ шляхом застосування багатофункціональних покриттів нанесених комбінованим способом.

Для отримання морфологічних формул досліджуваних сполучень включаємо визначені варіанти реалізації усіх ознак відповідно до досліджуваного сполучення із властивими ним енергетичними, технологічними, експлуатаційними та економічними показниками. Недоліком методу морфологічного аналізу є то, що побудована морфологічна матриця містить велику кількість несумісних варіантів, однак великою перевагою запропонованого методу дослідження є багатоваріантність. При цьому, слід зазначити, що морфологічний метод дослідження дозволяє аналізувати різні структури об'єкту, використовуючи системний підхід. Кількість можливих варіантів реалізації концепції забезпечення надійності ЗТ та їх елементів шляхом нанесення багатофункціональних покриттів відповідно до отриманої морфологічної матриці складає:

$$N = 5 \times 4 \times 4 \times 5 \times 5 \times 6 \times 6 \times 6 \times 5 \times 4 \times 4 \times 4 \times 5 \times 4 \times 4 \times 4 \times 4 \times 3 \times 3 \times 4 \times 4 \times 4 \times 4 \times 3 \times 5 \times 6 \times 3 \times 3 \times 3 \times 6 \times 4 \times 5 \times 3 \times 6 = 1,035 \times 10^{24}.$$

Для одного варіанту ТП відновлення деталей ЗТ при використанні морфологічної матриці формування ТП відновлювального ремонту:

$$N_1 = 138240.$$

Таким чином схема формування одного з варіантів реалізації концепції забезпечення надійності ЗТ та їх елементів шляхом нанесення багатофункціональних покриттів буде включати в себе наступні сполучення визначених ознак:

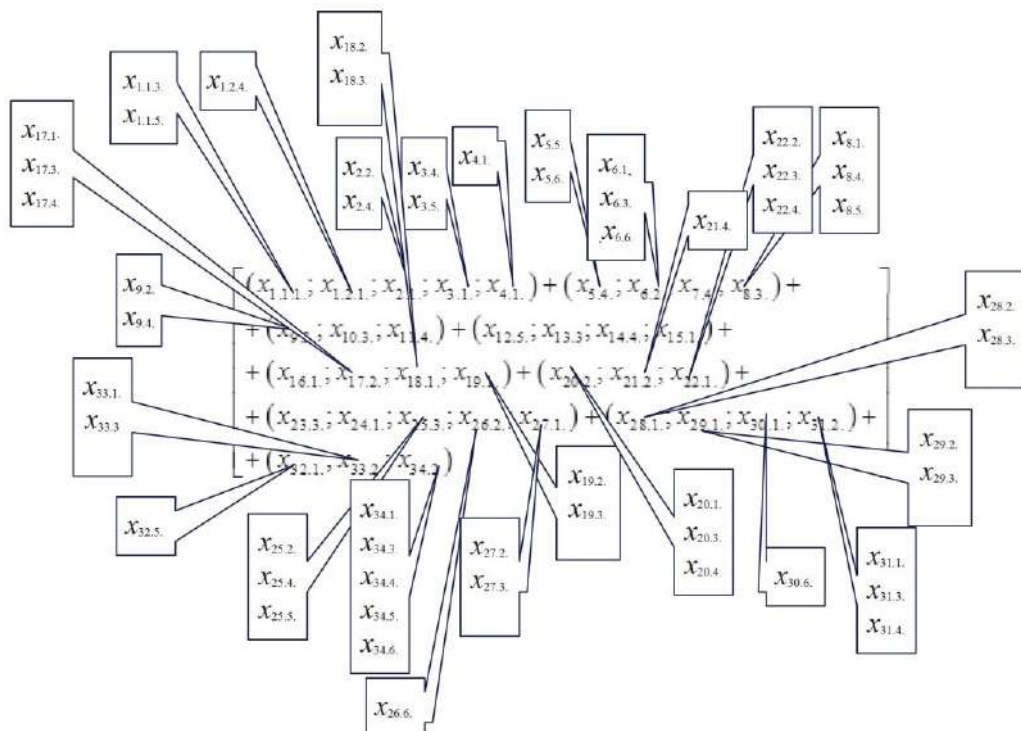
$$\left[\begin{aligned} &(x_{1.1.1.1}; x_{1.2.1}; x_{2.1}; x_{3.1}; x_{4.1}) + (x_{5.4}; x_{6.2}; x_{7.4}; x_{8.3}) + \\ &+ (x_{9.3}; x_{10.3}; x_{11.4}) + (x_{12.5}; x_{13.3}; x_{14.4}; x_{15.1}) + \\ &+ (x_{16.1}; x_{17.2}; x_{18.1}; x_{19.1}) + (x_{20.2}; x_{21.2}; x_{22.1}) + \\ &+ (x_{23.3}; x_{24.1}; x_{25.3}; x_{26.2}; x_{27.1}) + (x_{28.1}; x_{29.1}; x_{30.1}; x_{31.2}) + \\ &+ (x_{32.1}; x_{33.2}; x_{34.2}) \end{aligned} \right]$$

Для наземного транспорту ($x_{1.1.1.1}$) з двигуном внутрішнього згорання ($x_{1.2.1}; x_{2.1}$), в якому вузли та деталі призначені для передачі енергії ($x_{3.1}$) та перетворення руху ($x_{4.1}$) в процесі експлуатації зазнають навантаження крутіння ($x_{5.4}$) та працюють в агресивному середовищі ($x_{6.2}$) з порушенням технології термічної обробки ($x_{7.4}$), які працюють в зазначеному режимі навантаження ($x_{8.3}$). Для досліджуваного варіанту обрано циліндричні деталі ($x_{9.3}$) типу вал ($x_{10.3}$) з відновлюваною поверхнею ($x_{11.4}$). При формуванні ТП відновлення пошкодженої поверхні ($x_{11.4}$) шляхом використання багатофункціональних покриттів обрані наступні операції: – для підготовки відновлюваної поверхні обираємо ЕІЛ ($x_{12.5}$), який заснований на використанні концентрованого потоку енергії плазмового струменя іскрового розряду; – використання покриттів отриманих ЕДН ($x_{13.3}$), в основі якого лежить розпилення металу, розплавленого в електричній дузі, струменем продуктів згорання пропано-повітряної суміші; – ПА ($x_{14.4}$), головною особливістю якого є використання ефекту аномального масопереносу азоту на поверхні відновлюваної деталі, шляхом створення поля термічних напружень в поверхневому шарі за рахунок циклічного включення тліючого розряду. ПА ($x_{14.4}$) є ефективним методом вирішення проблеми обробки

відновлених поверхонь з покриттями отриманими ЕДН ($x_{13.3}$) при одночасному формуванні в них високоміцних поверхневих шарів і підвищенні їх експлуатаційних характеристик. Як альтернативний метод відновлення запропоноване вібродугове наплавлення ($x_{15.1}$). Виробничо-технічна база ремонтного виробництва з відновлення КЕ деталей ЗТ комбінованим методом, що поєднує ЕІЛ, ЕДН і ПА, в досліджуваному варіанті розглядає витрати енергетичних ресурсів на процес підготовки відновлюваної поверхні ($x_{16.1}$), розподіл праці на процес підготовки поверхні ($x_{17.2}$), вибір обладнання ($x_{18.1}$) та матеріалу ($x_{19.1}$) для ЕІЛ. Основною метою виконання стадії «технічний проект» ($x_{20.2}$) є вироблення остаточних проектних рішень щодо виробу загалом та його складових з урахуванням експлуатаційних вимог ($x_{21.2}$) при проектуванні ТП ($x_{22.3}$). Далі за допомогою морфологічної матриці ТП відновлення КЕ деталей ЗТ розглянемо основні складові комбінованої технології нанесення багатофункціональних покриттів. Процес ЕІЛ реалізували на установці «Елітрон-22», основними вузлами якої є електромагнітний збудник ($x_{23.3}$) і електрона комутуюча система [10-12] з детермінантним типом контакту інструменту ($x_{24.1}$). В якості матеріалу електроду використовуються ніхромові електроди ($x_{25.3}$) з визначеною тривалістю обробки ($x_{26.2}$), що забезпечує високу адгезійну міцність, та насиченням поверхні легуючими елементами ($x_{27.1}$). Для нанесення покриттів методом ЕДН у даному ТП використовується ручний стаціонарний апарат ($x_{28.1}$) АДН-10 з розпилювальною головкою, що швидко замінюється, з легкою і швидкою заміною дротів з одного діаметра на інший, високою електричною і термічною захищеністю, швидким доступом до всіх вузлів апарату, простими і швидкозамінними елементами для знімання струму, заміною роликів без розбирання апарату, блочно-вузловим збиранням, швидким технічним обслуговування і ремонтом [13-15]. В якості матеріалу покриття використовували дріт зі сталей аустенітного класу ($x_{29.1}$) зі встановленою швидкістю розпилювання ($x_{30.1}$) з метою підвищення зносостійкості ($x_{31.2}$). Фінішну обробку ПА проводимо з урахуванням часу дифузійного насичення ($x_{32.1}$) у суміші реакційного газу ($x_{33.2}$) для підвищення мікротвердості відновлюваної поверхні ($x_{34.2}$).

Сформований підхід дозволяє системно досліджувати усі можливі варіанти морфології ТП відновлення КЕ деталей ЗТ. Такий підхід дозволяє враховувати, крім вже відомих, ще і незвичайні варіанти, які при звичайному розгляданні могли бути втраченими. При цьому є можливість розглядати перспективні технічні рішення, які поки ще знаходяться на стадіях конструкторської і технологічної розробки.

Таким чином, реалізація наведеної концепції відновлювального ремонту дозволяє визначити та дослідити основні та супутні складові ТП, морфологічна формула якого має вигляд:



Виділена схема ТП відновлення зношених поверхонь КЕ деталей ЗТ шляхом нанесення багатофункціональних покриттів комбінованим способом може бути застосована для різних видів ЗТ та забезпечувати надійність відновлених деталей в процесі експлуатації.

Висновки

1. Представлено концепцію забезпечення надійності деталей ЗТ та їх елементів в процесі ремонту шляхом використання багатофункціональних покриттів. Розроблені основні принципи формування представленої концепції, показана реалізація концепції на базі використання системного підходу, аналізу матеріалів, особливостей конструкцій обладнання, режимів обробки на етапах процесу ремонту, основних статистичних та математичних методів, експериментальних досліджень.

2. Запропоновано загальну методологію, що здійснюється на базі застосування системного підходу до вирішення наукової проблеми, яка припускає аналіз системного оточення й формування множини стратегій вибору, функціонально-морфологічний аналіз і розробку системи показників якості, а також математичні описи й моделювання методу відновлення комбінованим методом нанесення багатофункціональних покриттів з метою синтезу розрахункових варіантів і створення механізму вибору кращого з них.

3. Реалізація концепції базується на використанні системного підходу, аналізу матеріалів, особливостей конструкцій обладнання, режимів обробки на етапах процесу ремонту, основних статистичних та математичних методах, експериментальних дослідженнях.

Визначено, що сформована морфологічна матриця містить велику кількість несумісних варіантів, що є недоліком методу, однак великою перевагою його є багатоваріантність. При цьому, слід відмітити, що метод дослідження оснований на морфології об'єктів, дозволяє системно аналізувати різні структури об'єкту, що впливають із закономірностей їх будови.

Перелік використаних джерел:

1. Радченко С.Г. Математическое моделирование технологических процессов в машиностроении / С.Г. Радченко. – К. : ЗАО «Укрспецмонтажпроект», 1998. – 274 с.
2. Радченко С.Г. Математичне моделювання та оптимізація технологічних систем: навчальний посібник / С.Г. Радченко. – К. : Політехніка, 2001. – 88 с.
3. Лапач С.М. Математичне моделювання та оптимізація технологічних систем: метод. вказівки до лаб.-комп'ют. практик. для студ. спец. «Технологія машинобудування» / С.М. Лапач. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 116 с.
4. Котельников Р.Б. Анализ результатов наблюдений / Р.Б. Котельников. – М., 1986. – 144 с.
5. Агеев М.С. Застосування комбінованих технологій відновлення для підвищення ресурсу деталей засобів транспорту / М.С. Агеев, І.В. Гришук, Е.К. Солових // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – 2020. – Вип. 194. – С. 81-92. – Режим доступу: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.194.2020.230412>.
6. Відновлення деталей засобів транспорту комбінованим методом нанесення багатофункціональних покриттів / М.С. Агеев, А.В. Рудковський, О.П. Грищенко, Е.К. Солових, С.О. Магопець // Вісник Хмельницького національного університету. – 2020. – № 3 (285). – С. 268-277. – (Серія: Технічні науки). – Режим доступу: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2020-285-3-43>.
7. Применение гибридных технологий для реновации и повышения ресурса судовых машин и механизмов / М.С. Агеев, А.В. Дудан, Т.В. Ворона, Б.А. Ляшенко // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2015. – Вип. №4(94). – С. 18-22. – (Серія: Машиностроение).
8. Вигерина Т.В. Оценка влияния параметров газотермического напыления покрытий на их свойства путем использования методов математического планирования / Т.В. Вигерина, М.С. Агеев, К.А. Данько // Вестник Полоцкого государственного университета. – 2017. – № 1. – С. 35-40. – (Серія В. Промышленность. Прикладные науки. Машиноведение и машиностроение).
9. Смоленцев В.П. Установка для электроискрового восстановления деталей / В.П. Смоленцев // Теория и практика машинного оборудования: труды Межд. науч.-техн. конф. – Воронеж, 1996. – С. 137-138.

10. Источники питания для ЭИЛ / С.П. Фурсов, А.М. Парамонов, И.В. Добында, А.В. Семенчук. – Кишинев: Штиинца, 1983. – 140 с.
11. Коротаев Д.Н. Система технического контроля электроискрового легирования / Д.Н. Коротаев // Инновационные материалы и технологии: достижения, проблемы, решения : матер. Межд. науч.-техн. конф. – Комсомольск-на-Амуре, 2013. – Часть 1. – С. 256-259.
12. Брусило Ю.В. Выбор оборудования для упрочнения и восстановления деталей поршневых двигателей электродуговым напылением / Ю.В. Брусило // Авиационно-космическая техника и технология. – 2010. – № 4(71). – С. 38-42.
13. Прядко А.С. Выбор оборудования для упрочнения и восстановления деталей автомобильного транспорта электродуговым напылением / А.С. Прядко, Ю.В. Брусило // Вестник Полоцкого государственного университета. – 2014. – № 3. – С. 121-126. – (Серия: Промышленность. Машиноведение и машиностроение).
14. Лопата Л.А. Повышения качества напыленных покрытий / Л.А. Лопата // Мир Техники и Технологий. – 2005. – № 8(54). – С. 54-56.

References:

1. Radchenko S.G. *Matematicheskoe modelirovanie tekhnologicheskikh protsessov v mashinostroenii* [Mathematical modeling of technological processes in mechanical engineering]. Kyiv, ZAO «Ukrspetsmontazhproekt» Publ., 1998. 274 p. (Rus.)
2. Radchenko S.G. *Matematichne modeliuvannia ta optimizatsiia tekhnologichnikh sistem: navchal'nyi posibnik* [Mathematical modeling and optimization of technological systems: a study guide]. Kyiv, Politekhnik Publ., 2001. 88 p. (Ukr.)
3. Lapach S.M. *Matematichne modeliuvannia ta optimizatsiia tekhnologichnikh sistem: metod. vказivki do lab.-komp'ut. praktik. dlia stud. spets. «Tekhnologiiia mashinobuduvannia»* [Mathematical modeling and optimization of technological systems: method. directions to the computer lab. practitioner for students special «Mechanical Engineering Technology»]. Kyiv, NTUU «KPI» Publ., 2007. 116 p. (Ukr.)
4. Kotelnikov R.B. *Analiz rezul'tatov nabliudenii* [Analysis of observational results]. Moscow, 1986. 144 p. (Rus.)
5. Ahieiev M.S., Gritsuk I.V., Solovykh E.K. Zastosuvannia kombinovanikh tekhnologii vidnovlennia dlia pidvishchennia resursu detalei zasobiv transportu [Application of combined technology for renovation and increased resource details of means of transport]. *Zbirnik naukovikh prats' Ukrain's'kogo derzhavnogo universitetu zaliznichnogo transportu – Collection of Scientific Works of the Ukrainian State University of Railway Transport*, 2020, vol. 194, pp. 81-92. doi: 10.18664/1994-7852.194.2020.230412. (Ukr.)
6. Ahieiev M.S., Rudkovskii A.V., Grishchenko O.P., Solovykh E.K., Magopets' S.O. Vidnovlennia detalei zasobiv transportu kombinovanim metodom nanesennia bagatofunktsional'nykh pokryttiv [Restoration of parts of means of transport by the combined method of application of multifunctional coatings]. *Visnik Khmel'nits'kogo natsional'nogo universitetu. Seriya: Tekhnichni nauki – Bulletin of the Khmelnytskyi National University. Series: Technical sciences*, 2020, № 3 (285), pp. 268-277. doi: 10.31891/2307-5732-2020-285-3-43. (Ukr.)
7. Ahieiev M.S., Dudan A.V., Vorona T.V., Liashenko B.A. Primenenie gibridnykh tekhnologii dlia renovatsii i povysheniia resursa sudovykh mashin i mekhanizmov [The use of hybrid technologies for renovation and increasing the service life of ship machines and mechanisms]. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie – Bulletin of the Brest State Technical University. Series: Mechanical engineering*, 2015, vol. 4(94), pp. 18-22. (Rus.)
8. Vigerina T.V., Ahieiev M.S., Dan'ko K.A. Otsenka vliianiia parametrov gazotermicheskogo napyleniia pokrytii na ikh svoistva putem ispol'zovaniia metodov matematicheskogo planirovaniia [Evaluation of the influence of parameters of thermal spraying of coatings on their properties by using methods of mathematical planning]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B. Promyshlennost'. Prikladnye nauki. Mashinovedenie i mashinostroenie – Bulletin of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Science. Mechanical engineering and mechanical engineering*, 2017, № 1, pp. 35-40. (Rus.)
9. Smolentsev V.P. Ustanovka dlia elektroiskrovogo vosstanovleniia detalei. *Trudy Mezhd. nauch.-tekhn. konf. «Teoriia i praktika mashinnogo oborudovaniia»* [Installation for electrospark

- restoration of parts. Proceedings of Int. Sci.-Techn. Conf. «Theory and practice of machinery»]. Voronezh, 1996, pp. 137-138. (Rus.)
10. Fursov S.P., Paramonov A.M., Dobynda I.V., Semenchuk A.V. *Istochniki pitaniia dlia EIL* [Power supplies for EIL]. Kishinev, Shtiintsa Publ., 1983. 140 p. (Rus.)
 11. Korotaev D.N. Sistema tekhnicheskogo kontroliia elektroiskrovogo legirovaniia. *Materiali Mezhd. nauch.-tekhn. konf. «Innovatsionnye materialy i tekhnologii: dostizheniia, problemy, resheniia»* [Technical control system for electrospark alloying. Proceedings of Int. sci.-tech. conf. «Innovative materials and technologies: achievements, problems, solutions»]. Komsomolsk-on-Amur, 2013, vol. 1, pp. 256-259. (Rus.)
 12. Brusilo Iu.V. Vybora oborudovaniia dlia uprochneniia i vosstanovleniia detalei porshnevnykh dvigatelei elektrodugovym napyleniem [Selection of equipment for hardening and restoration of piston engine parts by electric arc spraying]. *Aviatsionno-kosmicheskaiia tekhnika i tekhnologiia – Aerospace Engineering and Technology*, 2010, № 4(71), pp. 38-42. (Rus.)
 13. Priadko A.S., Brusilo Iu.V. Vybora oborudovaniia dlia uprochneniia i vosstanovleniia detalei avtomobil'nogo transporta elektrodugovym napyleniem [Selection of equipment for hardening and restoration of automotive transport parts by electric arc spraying]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Serii: Promyshlennost'. Mashinovedenie i mashinostroenie – Bulletin of Polotsk State University. Series: Industry. Mechanical engineering and mechanical engineering*, 2014, № 3, pp. 121-126. (Rus.)
 14. Lopata L.A. Povysheniia kachestva napylenykh pokrytii [Improving the quality of sprayed coatings]. *Mir Tekhniki i Tekhnologii – World of Engineering and Technology*, 2005, № 8(54), pp. 54-56.

Рецензент: О.В. Шарко

д-р техн. наук, доц., Херсонська державна морська академія

Стаття надійшла 15.05.2022

273 ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 629.463. 001.63

doi: 10.32782/2225-6733.44.2022.9

© Фомін О.В.¹, Ловська А.О.²**ВИЗНАЧЕННЯ НАВАНТАЖЕНОСТІ НЕСУЧОЇ КОНСТРУКЦІЇ
ВАГОНА-ЦИСТЕРНИ
З ПРУЖНЬО-ФРИКЦІЙНОЮ ХРЕБТОВОЮ БАЛКОЮ**

В статті наведені результати визначення навантаженості несучої конструкції вагона-цистерни з пружньо-фрикційною хребтовою балкою. Дослідження проведені стосовно вагона-цистерни моделі 15-1443-06, призначеного для перевезення світлих нафтопродуктів. Для визначення динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-цистерни сформовано математичну модель, яка враховує його переміщення при коливаннях підсакування. Зв'язок несучої конструкції з ходовими частинами описувався як послідовне пружне з'єднання. Вагон-цистерна при цьому розглядається як система з трьох твердих тіл – несучої конструкції та двох візків моделі 18-100 з ресорними комплектами, які мають жорсткість та коефіцієнт відносного тертя. Розв'язок системи диференціальних рівнянь руху вагона-цистерни здійснений за методом Рунге-Кутта при початкових умовах рівних нулю. Встановлено, що максимальне вертикальне прискорення, яке діє в центрі мас несучої конструкції вагона-цистерни при русі у порожньому стані складає близько $1,72 \text{ м/с}^2$ (0,17g), що майже на 20% нижче за прискорення в типовій конструкції. Розраховано основні показники міцності несучої конструкції вагона-цистерни. При цьому застосований метод скінчених елементів, який реалізовано в програмному комплексі SolidWorks Simulation (CosmosWorks). В якості скінчених елементів використовувалися просторові ізопараметричні тетраедри. Розрахунок здійснений в квазістатичі. Встановлено, що максимальні еквівалентні напруження виникають у зоні розміщення люка-лаза та складають 173,7 МПа, що на 13% нижче ніж у типовій конструкції. Проведені дослідження сприятимуть створенню напрацювань щодо проектування інноваційних конструкцій залізничних транспортних засобів з покращеними техніко-економічними характеристиками, а також підвищенню ефективності експлуатації залізничного транспорту.

Ключові слова: транспортна механіка, вагон-цистерна, несуча конструкція, динамічна навантаженість, міцність.

O.V. Fomin, A.O. Lovska. Determination of load-carrying capacity of tank wagon with a loaded-friction spine girder. This article shows the results of load-carrying capacity estimation of tank wagon with lumber-friction backbar. The research was carried out on the basis of tank wagon model 15-1443-06, designed for transportation of light petroleum products. To determine the dynamic load-bearing structure of the tank wagon, a mathematical model, which takes into account its displacement during rocking motion. The connection between the supporting structure and running parts is described as the last pipeline connection. In this case the tank car is regarded as a system of three solid bodies - a load-bearing structure and two trolleys of model 18-100 with reshoring kits, which have stiffness and coefficient of wear resistance. The system of differential ratings of tank wagon's motion was developed by Runge-Kutt method under zero initial conditions. It

¹ д-р техн. наук, професор, Державний університет інфраструктури та технологій, м. Київ, ORCID: 0000-0003-2387-9946, fomin1985@ukr.net

² д-р техн. наук, доцент, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, ORCID: 0000-0002-8604-1764, alyonaLovskaya.vagons@gmail.com

was found that the maximum vertical acceleration, which acts in the center of mass of the load-carrying structure of the tank-car in the empty state is about 1.72 m/s² (0,17g), which is about 20% lower than the acceleration of the standard structure. The main indicators of the strength of the load-bearing structure of the tank wagon were calculated. The method of joined elements, which is implemented in the SolidWorks Simulation (CosmosWorks) program complex, was used herewith. As lumped elements, we used spacious isoparametric tetrahedrons. The calculation was performed in quasi-statistics. It was found that the maximum equivalent loads occur in the area of the manhole placement are 173.7 MPa, which is 13% lower than in the standard structure. The conducted research will contribute to the creation of guidelines for the design of innovative structures of rail transport vehicles with improved technical and economic characteristics, as well as to increase the efficiency of the operation of rail transport.

Key words: *transport mechanics, tank car, load-bearing structure, dynamic load capacity, strength.*

Постановка проблеми. Забезпечення сталого розвитку транспортної галузі можливе при злагодженій роботі окремих її складових. Відомо, що привалюючий відсоток перевезень припадає на залізничний транспорт. Тому питання підвищення ефективності функціонування залізничного транспорту на сучасному етапі розвитку транспортної галузі вимагають особливої уваги.

Перевезення наливних вантажів залізницею здійснюється здебільшого в вагонах-цистернах. Несуча конструкція даного типу вагона випробовує значних динамічних навантажень в експлуатації, обумовлених як податливістю перевозимих вантажів, так і експлуатаційними режимами. Внаслідок циклічності дії таких навантажень можуть мати місце пошкодження складових несучої конструкції та необхідність здійснення позапланових видів ремонту. Крім того, виникнення пошкоджень несучої конструкції вагона на шляху прямування загрожує безпеці руху, в тому числі екологічності перевезень вантажів залізницею.

У зв'язку з цим виникає необхідність розробки та впровадження в експлуатацію інноваційних рішень щодо зменшення динамічної навантаженості несучих конструкцій вагонів в експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження динаміки транспортних засобів при ударній навантаженості несучих конструкцій проводиться у роботі [1]. Наведені математичні моделі, які дозволяють визначити прискорення, що діють на транспортні засоби при ударі.

Однак при цьому в роботі не запропоновано заходів щодо зменшення динамічної навантаженості транспортних засобів при експлуатаційних режимах.

Визначення можливих шляхів покращення техніко-економічних показників вагонів проводиться у роботі [2]. При цьому дані впровадження розглянуті на прикладі вантажних вагонів ВСННЛ. Однак в роботі не запропоновані заходи щодо зменшення динамічної навантаженості несучих конструкцій вагонів в експлуатації.

В роботі [3] наведені можливі удосконалення несучих конструкцій вагонів, а також вимоги, які повинні пред'являтися до їх сучасних моделей. Запропоновані технічні рішення щодо удосконалення спрямовані на підвищення строку служби вагонів. Важливо сказати, що зазначене удосконалення сприяє посиленню несучої конструкції вагона, а не зменшенню його динамічної навантаженості при експлуатаційних режимах.

В роботі [4] наведені напрямки удосконалень конструкцій вагонів-цистерн. Особливістю запропонованого вагона-цистерни є те, що котел має конусоподібні консольні вставки та беззачорний зчіпний пристрій.

Варіанти конструктивних та технічних рішень щодо підвищення ефективності перевезень рідких вантажів у вагонах-цистернах висвітлено у роботі [5]. Обґрунтовано найбільш раціональну конструктивну схему вагона-цистерни з точки зору підвищення продуктивності його використання.

Необхідно відмітити, що в даних роботах не запропоновані заходи щодо зменшення динамічної навантаженості несучих конструкцій вагонів-цистерн в експлуатації.

В роботі [6] наведені результати визначення навантаженості несучої конструкції вагона-цистерни при маневровому співударянні. Визначено вплив наливного вантажу на динамічну

навантаженість котла. Разом з цим, заходів щодо зменшення навантаженості вагона-цистерни в експлуатації авторами не запропоновано.

Заходи щодо зменшення динамічної навантаженості несучих конструкцій вантажних вагонів шляхом використання податливих зв'язків висвітлюються у роботах [7, 8]. Сформовані математичні моделі підтверджені шляхом комп'ютерного моделювання. Разом з цим питанням зменшення динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-цистерни в даних роботах уваги не приділяється.

Метою дослідження є висвітлення результатів визначення навантаженості несучої конструкції вагона-цистерни з пружньо-фрикційною хребтовою балкою. Для досягнення зазначеної мети поставлені такі завдання:

- визначити динамічну навантаженість несучої конструкції вагона-цистерни з пружньо-фрикційною хребтовою балкою;

- визначити міцність несучої конструкції вагона-цистерни.

Виклад основного матеріалу. Для зменшення динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-цистерни при експлуатаційних режимах пропонується впровадження в хребтову балку пружньо-фрикційних зв'язків. Дані зв'язки реалізуються шляхом створення хребтової балки з П-подібного профілю в якому розміщуються пружні елементи, перекриті горизонтальним листом. При роботі пружних елементів між вертикальними частинами П-подібного профілю та горизонтального листа виникають сили тертя завдяки чому зменшується динамічна навантаженість несучої конструкції вагона (рис. 1).



Рис. 1 – Переріз хребтової балки вагона-цистерни: а) типова хребтова балка; б) хребтова балка з пружними елементами

Дослідження проведені стосовно вагона-цистерни моделі 15-1443-06, призначеного для перевезення світлих нафтопродуктів.

Рама вагона-цистерни з пружньо-фрикційною хребтовою балкою наведена на рис. 2.

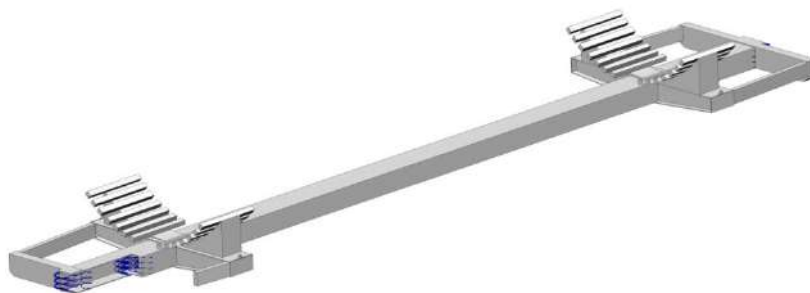


Рис. 2 – Рама вагона-цистерни з пружньо-фрикційною хребтовою балкою

Для визначення динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-цистерни з урахуванням запропонованих заходів здійснено математичне моделювання. Дослідження проведені в площині XZ [9, 10]. Розрахункова схема вагона-цистерни наведена на рис. 3.

Вагон-цистерна при цьому розглядається як система з трьох твердих тіл – несучої конструкції та двох візків моделі 18-100 з ресорними комплектами, які мають жорсткість та коефіцієнт відносного тертя.

Враховано, що переміщення несучої конструкції вагона-цистерни та візків відносно колії

однакові. Колія має пружно-в'язкі характеристики.

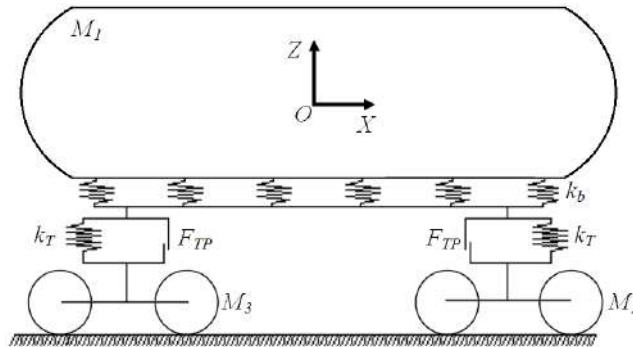


Рис. 3 – Розрахункова схема вагона-цистерни

Переміщення вагона-цистерни описуються рівняннями

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

де M_i – інерційні коефіцієнти елементів коливальної системи (несуча конструкція вагона-цистерни та дві ходові частини); C_{ij} – характеристика пружності елементів коливальної системи; B_{ij} – функція розсіювання; q_i – узагальнені координати, що відповідають поступальному переміщенню відносно вертикальної осі, відповідно, несучій конструкції вагона-цистерни, першого та другого візка; k – жорсткість колії; β – коефіцієнт демпфірування; F_{TP} – сила абсолютного тертя у ресорному комплекті; F_{TP}^p – сила тертя, яка виникає в хребтовій балці; δ_i – деформації пружних елементів ресорного підвішування; $\eta(t)$ – нерівності колії.

В рівняннях руху (1)-(3) прийнято

$Z_1 \sim q_1$ – координата, що характеризує поступальні переміщення несучої конструкції вагона-цистерни відносно вертикальної осі;

$Z_2 \sim q_2$ – координата, що характеризує поступальні переміщення першого візка за ходом руху відносно вертикальної осі;

$Z_3 \sim q_3$ – координата, що характеризує поступальні переміщення другого візка за ходом руху відносно вертикальної осі.

При цьому зв'язок несучої конструкції вагона-цистерни з ходовою частиною описувався як послідовне пружне з'єднання:

$$C = \frac{k_b \cdot (k_T + k_T)}{k_b + (k_T + k_T)}, \quad (2)$$

де k_T – жорсткість ресорного підвішування; k_b – жорсткість пружних елементів, які розміщуються в хребтовій балці.

Прийнято, що вагон переміщується у порожньому стані стиковою нерівністю, яка описується періодичною функцією [9]:

$$\eta(t) = \frac{h}{2}(1 - \cos \omega t), \quad (3)$$

де h – глибина нерівності; ω – частота коливань, яка визначається за формулою $\omega=2\pi V/L$ (V – швидкість руху вагона, L – довжина нерівності).

Вхідними параметрами моделі є технічні характеристики несучої конструкції вагона-цистерни, ресорного підвішування, а також збурюючої дії.

Розв’язок диференціальних рівнянь руху здійснений в програмному комплексі MathCad. При цьому початкові переміщення та швидкості покладені рівними нулю [11-13].

Розв’язок моделі в програмному комплексі MathCad визначався у вигляді

$$F(t, y) = \begin{bmatrix} y_4 \\ y_5 \\ y_6 \\ \frac{-F_{TP} \cdot (\text{sign}(\dot{\delta}_1) + \text{sign}(\dot{\delta}_2)) - C_{1,1} \cdot y_1 - C_{1,2} \cdot y_2 - C_{1,3} \cdot y_3 - F_{TP}^p \cdot \text{sign}(y_4)}{M_1} \\ \frac{F_{TP} \cdot \text{sign}(\dot{\delta}_1) + k(\eta_1 + \eta_2) + \beta(\dot{\eta}_1 + \dot{\eta}_2) - C_{2,1} \cdot y_1 - C_{2,2} \cdot y_2 - B_{2,2} \cdot y_5}{M_2} \\ \frac{F_{TP} \cdot \text{sign}(\dot{\delta}_2) + k(\eta_3 + \eta_4) + \beta(\dot{\eta}_3 + \dot{\eta}_4) - C_{3,1} \cdot y_1 - C_{3,3} \cdot y_3 - B_{3,3} \cdot y_6}{M_3} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$Z = \text{rkfixed}(Y0, m, tk, n, F)$.

При цьому $y_1 = q_1, y_2 = q_2, y_3 = q_3, y_4 = \dot{y}_1, y_5 = \dot{y}_2, y_6 = \dot{y}_3$.

Отримані результати наведені на рис. 4.

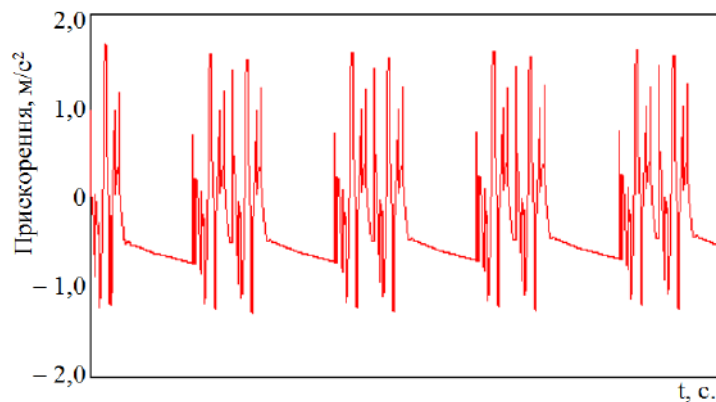


Рис. 4. – Прискорення несучої конструкції вагона-цистерни в центрі мас

Максимальне вертикальне прискорення несучої конструкції вагона-цистерни у порожньому стані складає близько 1,72 м/с² (0,17g). З урахуванням запропонованого рішення стає можливим знизити вертикальні прискорення, які діють на несучу конструкцію вагона-цистерни майже на 20%.

Для визначення основних показників міцності несучої конструкції вагона-цистерни проведено розрахунок за методом скінчених елементів в програмному комплексі SolidWorks Simulation (CosmosWorks). В якості скінчених елементів використовувалися просторові ізопараметричні тетраедри. Для визначення оптимальної кількості елементів застосований графоаналітичний метод [14, 15]. Кількість вузлів моделі склала 263879, елементів – 815114. Максимальний розмір елементу склав 40 мм, а мінімальний – 8 мм. Відсоток елементів з співвідношенням боків менше трьох – 19,2, більше десяти – 0,323. Мінімальна кількість елементів в колі склала 9, співвідношення збільшення розміру елементів – 1,7. Матеріал несучої конструкції вагона – сталь марки 09Г2С.

Розрахункова схема несучої конструкції вагона-цистерни наведена на рис. 5. Розрахунок здійснений в квазістатичі. При складанні розрахункової схеми враховано, що на несучу конст-

рукцію діє вертикальне динамічне навантаження P_{δ}^{δ} з урахуванням використання повної вантажопідйомності умовним вантажем, а також тиск від наливного вантажу $P_{нв}$. Закріплення моделі здійснювалося в зонах обпирання несучої конструкції на ходові частини.

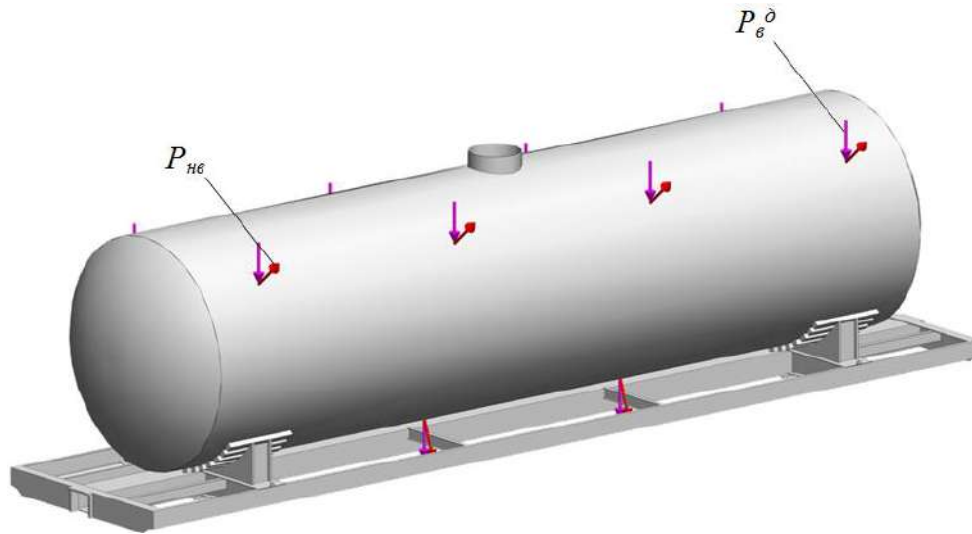


Рис. 5 – Розрахункова схема несучої конструкції вагона-цистерни

Результати розрахунку на міцність несучої конструкції вагона-цистерни наведені на рис. 6.

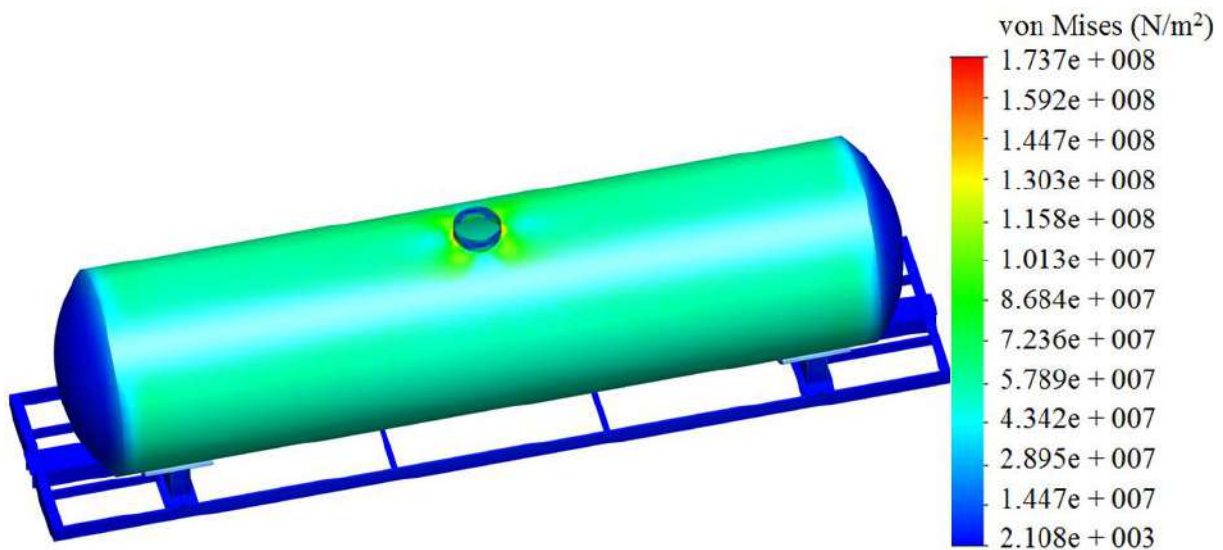


Рис. 6 – Напружений стан несучої конструкції вагона-цистерни

Максимальні еквівалентні напруження при цьому виникають у зоні розміщення люка-лаза та складають 173,7 МПа, а отже не перевищують допустимих значень [16, 17]. Важливо сказати, що отримана величина напружень на 13% нижче ніж у типовій конструкції.

Проведені розрахунки доводять, що використання пружньо-фрикційних зв'язків в несучій конструкції вагона-цистерни є доцільним рішенням.

Висновки

1. Визначено динамічну навантаженість несучої конструкції вагона-цистерни з пружньо-фрикційною хребтовою балкою. Для цього сформовано математичну модель, яка враховує переміщення несучої конструкції вагона-цистерни в вертикальній площині.

Максимальне вертикальне прискорення несучої конструкції вагона-цистерни у порож-

ньому стані складає близько $1,72 \text{ м/с}^2$ ($0,17g$). З урахуванням запропонованого рішення стає можливим знизити вертикальні прискорення, які діють на несучу конструкцію вагона-цистерни майже на 20%.

2. Визначено міцність несучої конструкції вагона-цистерни. Максимальні еквівалентні напруження при цьому виникають у зоні розміщення люка-лаза та складають 173,7 МПа, що на 13% нижче ніж у типовій конструкції.

Проведені дослідження сприятимуть створенню напрацювань щодо проектування інноваційних конструкцій залізничних транспортних засобів з покращеними техніко-економічними характеристиками, а також підвищенню ефективності експлуатації залізничного транспорту.

Перелік використаних джерел:

1. Jan Zamecnik. Evaluation of wagon impact tests by various measuring equipment and influence of impacts on cargo stability / Jan Zamecnik, Juraj Jagelcak // Communications. – 2015. – No. 4. – Pp. 21-27. – Mode of access: <https://doi.org/10.26552/com.C.2015.4.21-27>.
2. Chen Chao. Study of Railway Freight Vehicle Body's Dynamic Model Based on Goods Loading Technical Standards / Chen Chao, Han Mei, Han Yanhui // Procedia Engineering. – 2012. – No. 29. – Pp. 3572-3577. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.533>.
3. M. Płaczek. A concept of technology for freight wagons modernization / M. Płaczek, A. Wróbel, A. Buchacz // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – No. 161(2016). – Pp. 1-12. – Mode of access: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/161/1/012107>.
4. Атаманчук Н. А. Направления совершенствования конструкций вагонов-цистерн для перевозки нефтепродуктов / Атаманчук Н. А., Цыганская Л. В. // Транспорт Российской Федерации. – 2013. – № 3(46). – С. 14-17.
5. Собержанский А.Н. Совершенствование конструкций вагонов-цистерн / А.Н. Собержанский, Л.В. Цыганская // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. – 2010. – Вип. 35. – С. 25-28.
6. Integration of geometry and analysis for the study of liquid sloshing in railroad vehicle dynamics / H. Shi, L. Wang, B. Nicolsen, A. A Shabana // Proc IMechE, Part K: J Multi-body Dynamics. – 2017. – Vol. 231, iss. 4. – Pp. 608-629. – Mode of access: <https://doi.org/10.1177/1464419317696418>.
7. Establishing patterns in the dynamic loading on the body of a semi-wagon with an elastic middle part of the girder beam / O. Fomin, A. Lovska, I. Medvediev, H. Shatkovska // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2020. – № 5/7(107) – Pp. 30-37. – Mode of access: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.211936>.
8. Determining the load on the long-based structure of the platform car with elastic elements in longitudinal beams / S. Panchenko, O. Fomin, G. Vatulia, O. Ustenko, A. Lovska // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – №1/7 (109). – Pp. 6-13. – Mode of access: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.224638>.
9. Дьомін Ю.В. Основи динаміки вагонів / Ю.В. Дьомін, Г.Ю. Черняк. – К. : КУЕТТ, 2003. – 269 с.
10. Fomin Oleksij. Establishing patterns in determining the dynamics and strength of a covered freight car, which exhausted its resource / O. Fomin, A. Lovska // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2020. – Vol. 6, no. 7 (108). – Pp. 21-29. – Mode of access: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.217162>.
11. The concept of the organization of interaction of elements of military radio communication systems / I.O. Romanenko, A.V. Shyshatskyi, R.M. Zhyvotovskiy, S.M. Petruk // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2017. – No. 1. – Pp. 97-100. – Mode of access: <https://doi.org/10.30748/nitps.2017.26.20>.
12. The improvement of method for the multi-criteria evaluation of the effectiveness of the control of the structure and parameters of interference protection of special-purpose radio communication systems / A. Minochkin, A. Shyshatskyi, V. Hasan, A. Hasan, A. Opalak, A. Hlushko, O. Demchenko, A. Lyashenko, O. Havryliuk, S. Ostapenko // Technology Audit and Production Reserves. – 2021. – Vol. 4, no. 2(60). – Pp. 22-27. – Mode of access: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.235465>.
13. Calculation of loads on carrying structures of articulated circular-tube wagons equipped with new

- draft gear concepts / Alyona Lovska, Oleksij Fomin, Pavel Kučera, Václav Píštěk // Applied Science. – 2020. – Vol. 10, 7441. – Pp. 1-11. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/app10217441>.
14. Rationalization of cross-sections of the composite reinforced concrete span structure of bridges with a monolithic reinforced concrete roadway slab / G.L. Vatulia, O.V. Lobiak, S.V. Deryzemlia, M.A. Verevicheva, Ye.F. Orel // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 664, 012014. – Pp. 1-9. – Mode of access: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/664/1/012014>.
 15. Vatulia G. Optimization of the truss beam. Verification of the calculation results / G. Vatulia, S. Komagorova, M. Pavliuchenkov // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 230, 02037. – Pp. 1-8. – Mode of access: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823002037>.
 16. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). – Введ. 2015-07-01. – Київ, 2015. – 162 с.
 17. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. – Введ. 2016-07-01. – М. : Стандартинформ, 2016. – 54 с.

References:

1. Jan Zamecnik, Juraj Jagelcak. Evaluation of wagon impact tests by various measuring equipment and influence of impacts on cargo stability. *Communications*, 2015, no. 4, pp. 21-27. **doi: 10.26552/com.C.2015.4.21-27**.
2. Chen Chao, Han Mei, Han Yanhui. Study of Railway Freight Vehicle Body's Dynamic Model Based on Goods Loading Technical Standards. *Procedia Engineering*, 2012, no. 29, pp. 3572-3577. **doi: 10.1016/j.proeng.2012.01.533**.
3. M. Płaczek, A. Wróbel, A. Buchacz. A concept of technology for freight wagons modernization. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2016, no. 161(2016), pp. 1-12. **doi:10.1088/1757-899X/161/1/012107**.
4. Atamanchuk N.A., Cyganskaya L.V. Napravleniya sovershenstvovaniya konstrukcij vagonov-cistern dlya perevozki nefteproduktov [Directions for improving the design of tank cars for the transportation of petroleum products]. *Transport Rossijskoj Federacii – Transport of the Russian Federation*, 2013, №3(46), pp. 14-17. (Rus.)
5. Soberzhanskij A.N., Cyganskaya L.V. Sovershenstvovanie konstrukcij vagonov-cistern [Improving the designs of tank cars]. *Visnik Dnipropetrovs'kogo nacional'nogo universitetu zalizničnogo transportu im. akademika V. Lazaryana – Bulletin of Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 2010, vol. 35, pp. 25-28. (Rus.)
6. Shi H., Wang L., Nicolsen B., A Shabana A. Integration of geometry and analysis for the study of liquid sloshing in railroad vehicle dynamics. *Proc IMechE, Part K: J Multi-body Dynamics*, 2017, vol. 231, iss. 4, pp. 608-629. **doi: 10.1177/1464419317696418**.
7. Fomin O., Lovska A., Medvediev I., Shatkovska H. Establishing patterns in the dynamic loading on the body of a semi-wagon with an elastic middle part of the girder beam. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020, № 5/7(107), pp. 30-37. **doi: 10.15587/1729-4061.2020.211936**.
8. Panchenko S., Fomin O., Vatulia G., Ustenko O., Lovska A. Determining the load on the long-based structure of the platform car with elastic elements in longitudinal beams. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021, №1/7 (109), pp. 6-13. **doi: 10.15587/1729-4061.2021.224638**.
9. Domin Yu. V., Chernyak G. Yu. *Osnovi dinamiki vagoniv* [Fundamentals of Carriage Dynamics]. Kyiv, KUETT Publ., 2003. 269 p. (Ukr.)
10. Fomin O., Lovska A. Establishing patterns in determining the dynamics and strength of a covered freight car, which exhausted its resource. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020, vol. 6, no. 7 (108), pp. 21-29. **doi: 10.15587/1729-4061.2020.217162**
11. Romanenko I.O., Shyshatskyi A.V., Zhyvotovskyyi R.M., Petruk S.M. The concept of the organization of interaction of elements of military radio communication systems. *Nauka i tekhnika*

- Povitrianih Sil Zbroinikh Sil Ukraini – Science and Technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine*, 2017, no. 1, pp. 97-100. doi: 10.30748/nitps.2017.26.20.
12. Minochkin A., Shyshatskyi A., Hasan V., Hasan A., Opalak A., Hlushko A., Demchenko O., Lyashenko A., Havryliuk O., Ostapenko S. The improvement of method for the multi-criteria evaluation of the effectiveness of the control of the structure and parameters of interference protection of special-purpose radio communication systems. *Technology Audit and Production Reserves*, 2021, vol. 4, no. 2(60), pp. 22-27. doi: 10.15587/2706-5448.2021.235465.
 13. Lovska A., Fomin O., Kučera P., Pištěk V. Calculation of loads on carrying structures of articulated circular-tube wagons equipped with new draft gear concepts. *Applied Science*, 2020, vol. 10, 7441, pp. 1-11. doi: 10.3390/app10217441.
 14. Vatulia G.L., Lobiak O.V., Deryzemlia S.V., Verevicheva M.A., Orel Ye.F. Rationalization of cross-sections of the composite reinforced concrete span structure of bridges with a monolithic reinforced concrete roadway slab. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 664, 012014, pp. 1-9. doi: 10.1088/1757-899X/664/1/012014.
 15. Vatulia G., Komagorova S., Pavliuchenkov M. Optimization of the truss beam. Verification of the calculation results. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 230, 02037, pp. 1-8. doi: 10.1051/mateconf/201823002037.
 16. DSTU 7598:2014. *Vagoni vantazhni. Zagalni vimogi do rozrahunkiv ta proektuvannya novih i modernizovanih vagoniv kolii 1520 mm (nesamohidnih)* [State standart 7598: 2014. Freight cars. Zagalni vimogi do rozrahunkiv ta proektuvannya new and modernizovanih vagoniv kolii 1520 mm (nesamohidnih)]. Kyiv, 2015. 162 p. (Ukr.)
 17. GOST 33211-2014. *Vagony gruzovye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam* [State standart 33211-2014. Freight cars. Requirements for durability and dynamic qualities]. Moskva: Standartinform, 2016. 54 p. (Rus.)

Рецензент: С.Ю. Сапронова
д-р техн. наук, проф., ДУІТ

Стаття надійшла 13.01.2022

УДК 629.463.001.63

doi: 10.32782/2225-6733.44.2022.10

© Фомін О.В.¹, Ловська А.О.², Сова С.С.³, Литвиненко А.С.⁴

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОЇ НАВАНТАЖЕНОСТІ НЕСУЧОЇ КОНСТРУКЦІЇ ВАГОНА-ХОПЕРА

В статті наведені результати комп'ютерного моделювання температурної навантаженості несучої конструкції вагона-хопера. Для цього створено просторову модель несучої конструкції вагона-хопера в програмному комплексі SolidWorks. В якості прототипу обраний вагон-хопер моделі 20-9749, побудови ДП "Укрспецвагон" та призначений для перевезення окатишів та гарячого агломерату. Розрахунок на міцність несучої конструкції вагона-хопера проведений за методом скінчених елементів, який реалізовано в програмному комплексі CosmosWorks. При скла-

¹ д-р техн. наук, професор, Державний університет інфраструктури та технологій, м. Київ, ORCID: 0000-0003-2387-9946, fomin1985@ukr.net

² д-р техн. наук, доцент, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, ORCID: 0000-0002-8604-1764, alyonaLovskaya.vagons@gmail.com

³ аспірант, Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, м. Северодонецьк, ORCID: 0000-0002-9810-8957, gorbunov0255@gmail.com

⁴ аспірант, Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, м. Северодонецьк, ORCID: 0000-0002-5182-9607, andrijlitvinenko7@gmail.com

данні розрахункової схеми враховано температурний вплив від перевозимого вантажу на внутрішню поверхню кузова вагона-хопера. Результати розрахунку показали, що максимальні еквівалентні напруження в несучій конструкції вагона-хопера становлять близько 340 МПа і зосереджені в зоні взаємодії хребтової балки зі шворневою. Максимальні напруження в несучій конструкції вагона-хопера, які зумовлені температурним навантаженням виникають у вертикальних стійках та горбиль і складають 335 МПа, що на 3% нижче за напруження плинності матеріалу конструкції. Визначено вплив температурного навантаження на показники міцності несучої конструкції вагона-хопера. Встановлено, що дана залежність є лінійною. Максимальні еквівалентні напруження при температурі перевозимого вантажу у 700°C майже дорівнюють межі плинності матеріалу конструкції. При незначному збільшенні температурного впливу на несучу конструкцію її показники міцності не будуть забезпечуватися. Тому виникає необхідність удосконалення несучої конструкції вагона-хопера для забезпечення його міцності в експлуатації. Проведені дослідження сприятимуть створенню напрацювань щодо проектування сучасних конструкцій вантажних вагонів з покращеними техніко-економічними показниками.

Ключові слова: транспортна механіка, вагон-хопер, несуча конструкція, міцність, навантаженість кузова, температурний вплив.

O.V. Fomin, A.O. Lovska, S.S. Sova, A.S. Lytvynenko. Computer modeling of the temperature resistance of the load-bearing structure of the hopper car. This article describes the results of computer modeling of temperature resistance of the hopper car load-bearing structure. For this purpose, a spacious model of load-bearing structure of an opera-car in SolidWorks program complex was created. As a prototype the hopper car model 20-9749 was used, which was built by "Ukrspetsvagon" and is intended for transportation of pellets and hot sinter. Calculation of the strength of the load-bearing structure of the operating car was carried out by the method of concatenated elements, which is implemented in the program complex CosmosWorks. When creating the design scheme, the temperature impact of the transported cargo on the inner surface of the hopper body was taken into account. The results of the calculation showed that the maximum equivalent loads in the load-bearing structure of the hopper car is about 340 MPa and is located in the area of interaction between the backbone beam with the kingpin. The maximum load in the load-bearing structure of the opera-car, which is caused by temperature pressure, occurs in the vertical struts and hump and amounts to 335 MPa, which is 3% lower than the load of the plinth of the material of the structure. The influence of temperature load on the indicators of load-bearing capacity of opera-car structure has been determined. It was found that this dependence is linear. The maximum equivalent loads at a temperature of transported cargo at 700°C are more or less equal to the plinth of the material of the structure. With a slight increase in the temperature impact on the supporting structure of its strength indicators will not be ensured. Therefore, there is a need to improve the load-bearing structure of the opera car to ensure its durability in operation. The conducted research will contribute to the creation of guidelines for the design of modern designs of freight cars with improved technical and economical indicators.

Key words: transport mechanics, hopper car, load-bearing structure, strength, body load, temperature influence.

Постановка проблеми. Забезпечення плідного функціонування транспортної галузі зумовлює необхідність впровадження в експлуатацію сучасних транспортних засобів. Оскільки основний сегмент перевізного процесу відводиться залізничному транспорту, то до створення сучасних конструкцій вагонів повинні перед'являтися особливі вимоги.

Одним з найбільш поширених типів вагонів, які експлуатуються на коліях промислових підприємств є вагони-хопери для перевезення гарячого агломерату з температурою не вище 700°C, а також сипучих матеріалів (щебінь, пісок, вугілля, керамзит), які не потребують захисту

від атмосферних опадів [1]. Особливістю цих вагонів є те, що обшивка бокових стін не приварюється до стійок, а навішується на каркас.

Важливим напрямком розвитку питань створення перспективних вагонів-хоперів є оптимізація їх кузовів. Це дозволило б здійснити зменшення їх матеріалоемності при дотриманні вантажопідйомності не нижче до відповідних конструкцій вагонів-прототипів. Таке рішення сприятиме зменшенню витрат на виготовлення вагонів, їх експлуатацію, а також підвищенню ефективності перевізного процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Прогнозування залишкового ресурсу вагона хопер-дозатора після тривалої експлуатації з урахуванням фактичних фізико-механічних характеристик матеріалу несучих конструкцій проводиться у роботі [2]. Приведені результати віртуальних та експериментальних досліджень міцності несучої конструкції вагона.

Особливості удосконалення конструкції вагона-хопера для перевезення зерна висвітлюються у публікації [3]. Можливість оптимізації елементів кузова вагона проведено за аналізом найбільш характерних вузлів і конструктивних ознак спеціалізованих бункерних вагонів для перевезення сипучих вантажів. Тобто враховано досвід експлуатації окремих складових кузова з подальшою інтеграцією у нову конструкцію. Однак в розглянутих роботах при проведенні розрахунків на міцність несучих конструкцій вагонів не враховано температурного впливу на їх складові.

В роботі [4] наведені особливості топологічної оптимізації кузова вагона. При цьому використано комп'ютерне моделювання з застосуванням методу скінчених елементів. Результати досліджень підтвердили ефективність використання запропонованої методології для кузовів вагонів. При цьому у якості прикладу розрахунок проведений для кузова пасажирського вагона. Стосовно несучої конструкції вагона-хопера, як найбільш навантаженого типу вагона в експлуатації, дана методика не використовувалася.

Питання оптимізації кузовів вантажних вагонів відкритого типу з несучою підлогою висвітлені у роботі [5]. Розроблений алгоритм сумісної структурної та параметричної оптимізації бокової стіни та рами напіввагона з несучою підлогою під осьове навантаження 25 т/вісь. Разом з цим питання визначення температурного впливу на несучу конструкцію вагона в роботі не проводилося.

Структурно-оптимізаційна концепція створення кузова вагона з алюмінієвих панелей висвітлюється у публікації [6]. Особливістю панелей є те, що вони виготовлені по типу "сандвіч". Характеристична функція пошуку оптимальної комбінації визначена максимальними напруженнями та зміщеннями.

В роботах [7, 8] проведено визначення навантаженості несучої конструкції вагона-хопера при експлуатаційних режимах. Запропоновано заходи щодо підвищення ефективності експлуатації вагона-хопера. Однак при проведенні розрахунків на міцність авторами не враховано температурного впливу на складові несучої конструкції.

Аналіз літературних джерел [2-8] дозволяє зробити висновок, що питанням визначення температурного впливу на несучу конструкцію вагона-хопера не приділялося належної уваги. Це зумовлює необхідність проведення відповідних досліджень в цьому напрямку.

Метою дослідження є визначення залежності максимальних еквівалентних напружень в несучій конструкції вагона-хопера від температурного впливу перевозимого у ньому вантажу. Для досягнення зазначеної мети поставлені такі завдання:

- провести розрахунок на міцність несучої конструкції вагона-хопера з урахуванням температурного впливу на його складові;
- визначити вплив температурного навантаження на максимальні еквівалентні напруження в несучій конструкції вагона-хопера.

Виклад основного матеріалу. Для визначення температурної навантаженості несучої конструкції вагона-хопера проведено розрахунок за методом скінчених елементів. Для цього побудовано його просторову модель в програмному комплексі SolidWorks. У якості вагона-прототипу обраний вагон-хопер моделі 20-9749, побудови ДП «Укрспецвагон» (Україна).

Просторову геометричну модель несучої конструкції вагона-хопера наведено на рис. 1.

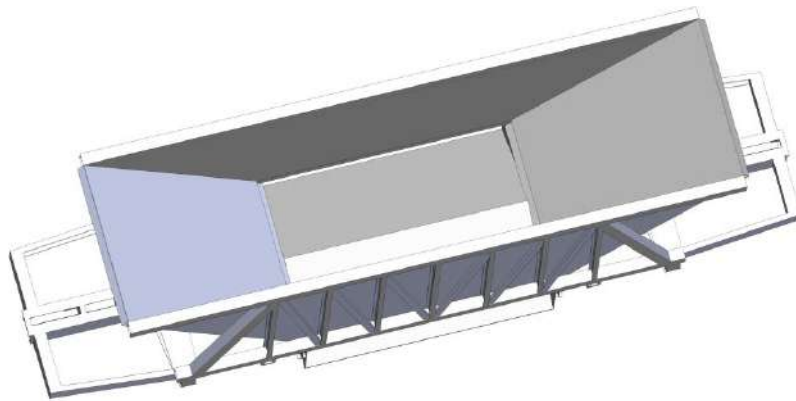


Рис. 1 – Просторова модель несучої конструкції вагона-хопера

Розрахунок реалізований в середовищі програмного комплексу CosmosWorks [9-11]. При складанні скінчено-елементної моделі враховані ізопараметричні тетраедри. Оптимальна кількість елементів моделі визначена за графоаналітичним методом [12, 13]. Кількість вузлів моделі склала 126221, елементів – 376670. Максимальний розмір елемента склав 60 мм, а мінімальний – 12 мм. Відсоток елементів з співвідношенням боків менше трьох – 7,43. Відсоток елементів з співвідношенням боків більше десяти – 32,5. Мінімальна кількість елементів в колі склала 9, співвідношення збільшення розміру елементів – 1,6.

Розрахункова схема несучої конструкції вагона-хопера при найбільш несприятливому експлуатаційному режимі – маневрове співударяння, наведена на рис. 2.

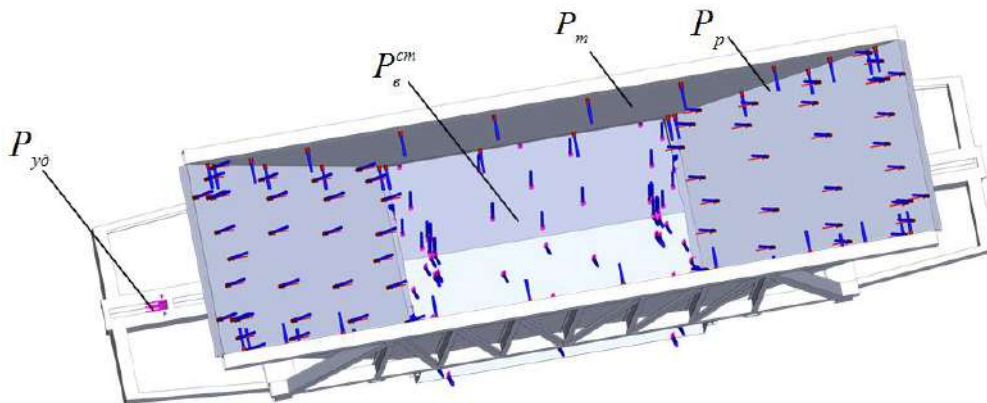


Рис. 2 – Розрахункова схема несучої конструкції вагона-хопера

Враховано, що на несучу конструкцію вагона діє вертикальне статичне навантаження P_{σ}^{cm} . Також на конструкцію кузова діє тиск розпору від насипного вантажу P_p , чисельне значення якого знайдено за формулою (1). На вертикальну поверхню заднього упору діє ударне навантаження P_{y0} , чисельне значення якого відповідно до нормативних документів становить 3,5 МН [14, 15]. До внутрішніх поверхонь кузова прикладалося температурне навантаження P_m , яке дорівнює 700°C.

Активний тиск розпору насипного вантажу визначений за формулою [1]

$$P_a = \gamma \cdot g \cdot H \cdot \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right), \quad (1)$$

де γ – щільність насипного вантажу, т/м³;
 H – висота бокової стіни, м;
 φ – кут природнього відкосу вантажу, рад;
 g – прискорення вільного падіння, м/с².

Закріплення моделі здійснювалося в зонах обпирання кузова на ходові частини. Матеріал конструкції – сталь марки 09Г2С. Результати розрахунку наведені нижче (рис. 3, 4).

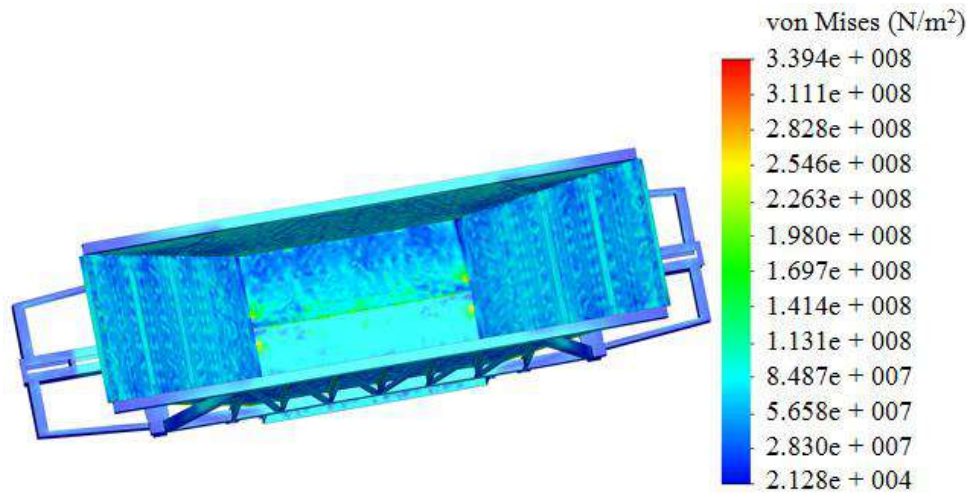


Рис. 3 – Напружений стан несучої конструкції вагона-хопера

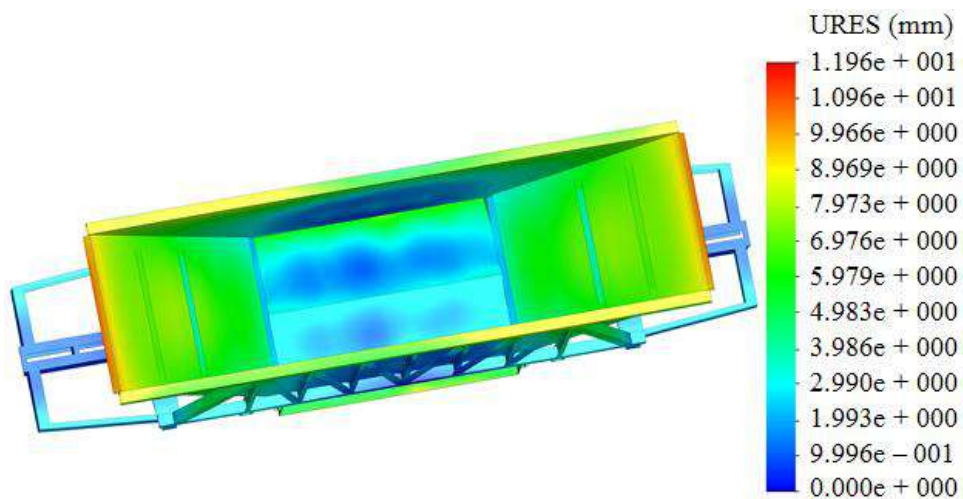


Рис. 4 – Переміщення в вузлах несучої конструкції вагона-хопера

Максимальні еквівалентні напруження в несучій конструкції вагона-хопера становлять близько 340 МПа і зосереджені в зоні взаємодії хребтової балки зі шворневою. Максимальні переміщення виникають в розвантажувальних бункерах, а також верхньому об'язуванні і складають близько 12,0 мм. Максимальні напруження в несучій конструкції вагона-хопера, які зумовлені температурним навантаженням виникають у вертикальних стійках та горбилі.

За розрахунковою схемою, наведеною на рис. 2, побудовано розподілення максимальних еквівалентних напружень за висотою стійки. Результати розрахунку наведено на рис. 5.

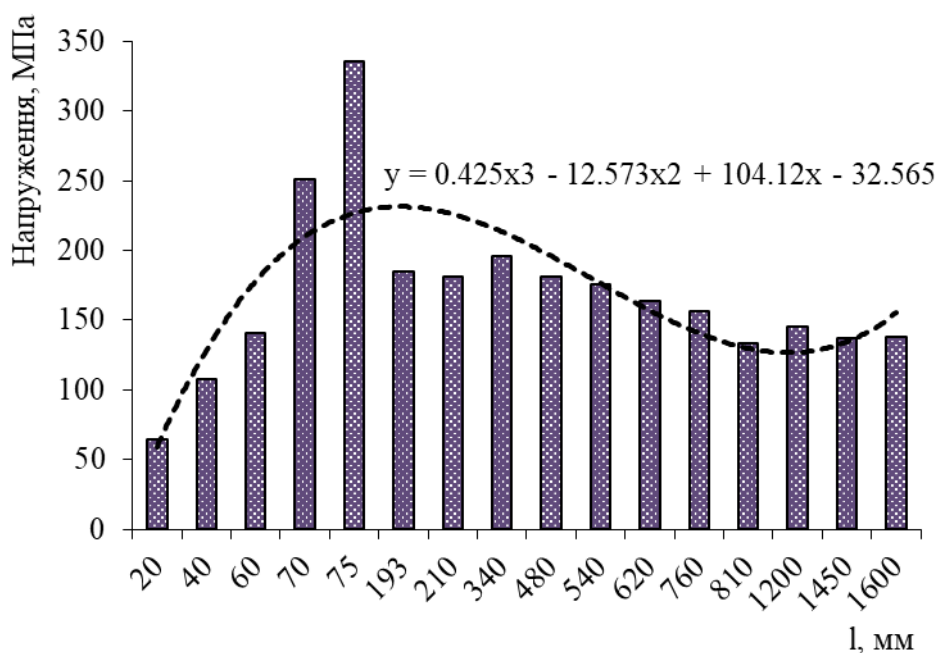


Рис. 5 – Розподілення максимальних еквівалентних напружень за висотою стійки вагона-хопера

При цьому максимальне еквівалентне напруження виникає ближче до нижньої частини стійки і складає 335 МПа, що на 3% нижче за напруження плинності матеріалу конструкції [14, 15].

На рис. 6 наведено залежність максимальних еквівалентних напружень в вертикальній стійці вагона-хопера від температурного впливу.

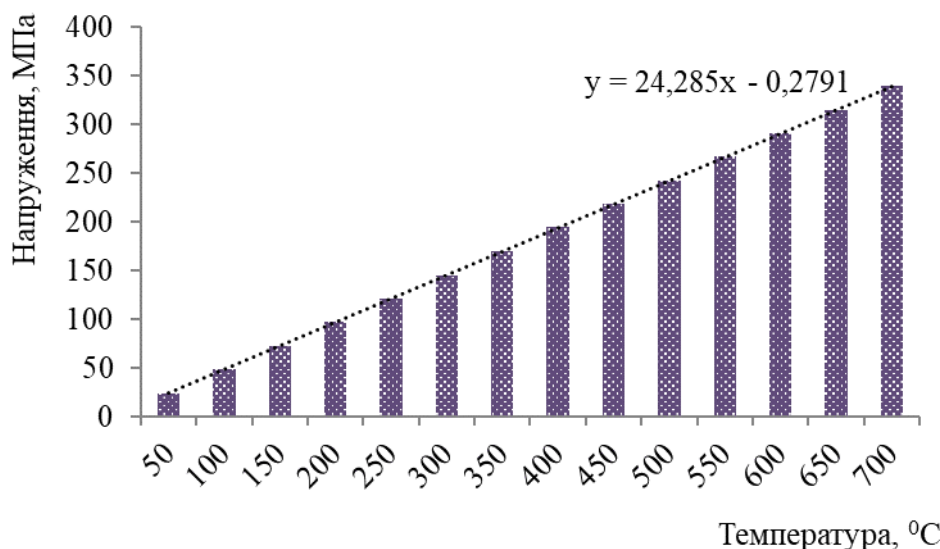


Рис. 6 – Залежність максимальних еквівалентних напружень в вертикальній стійці вагона-хопера від температурного впливу

З рис. 6 видно, що дана залежність є лінійною. При цьому напруження знімалися з найбільш навантаженої зони вертикальної стійки.

Максимальні еквівалентні напруження при температурі перевозимого вантажу у 700°C майже дорівнюють межі плинності матеріалу конструкції. При незначному збільшенні температурного впливу на несучу конструкцію її показники міцності не будуть

забезпечуватися. Це викликає необхідність створення заходів щодо забезпечення міцності складових несучої конструкції вагона-хопера. Наприклад, удосконалення несучої конструкції вагона-хопера шляхом виконання найбільш навантажених складових з термостійкого матеріалу.

Висновки

1. Проведено розрахунок на міцність несучої конструкції вагона-хопера з урахуванням температурного впливу на його складові. Встановлено, що максимальні еквівалентні напруження в несучій конструкції вагона-хопера становлять близько 340 МПа і зосереджені в зоні взаємодії хребтової балки зі шворневою.

Максимальні напруження в несучій конструкції вагона-хопера, які зумовлені температурним навантаженням виникають у вертикальних стійках та горбилі і складають 335 МПа, що на 3% нижче за напруження плинності матеріалу конструкції.

2. Визначено вплив температурного навантаження на максимальні еквівалентні напруження в несучій конструкції вагона-хопера. Встановлено, що дана залежність є лінійною. Максимальні еквівалентні напруження при температурі перевозимого вантажу у 700°C майже дорівнюють межі плинності матеріалу конструкції. При незначному збільшенні температурного впливу на несучу конструкцію її показники міцності не будуть забезпечуватися. Тому виникає необхідність удосконалення несучої конструкції вагона-хопера для забезпечення його міцності в експлуатації.

Проведені дослідження сприятимуть створенню напрацювань щодо проектування сучасних конструкцій вантажних-вагонів з покращеними техніко-економічними показниками.

Перелік використаних джерел:

1. Конструирование и расчет вагонов / В.В. Лукин, Л.А. Шадур, В.И. Котуранов, А.А. Хохлов, П.С. Анисимов. – М. : УМК МПС России, 2000. – 731 с.
2. Путятю А.В. Прогнозирование остаточного ресурса вагона хоппер-дозатора после длительной эксплуатации с учетом фактических физико-механических характеристик материала несущей конструкции / А.В. Путятю, Е.Н. Коновалов, П.М. Афанаськов // Механика машин, механизмов и материалов. – 2016. – № 1(34). – С. 26-35.
3. Удосконалення конструкції вагона-хопера для перевезення зерна / Ю.В. Кебал, В.А. Шатов, О.М. Тьокотев, Н.Г. Мурашова // Збірник наукових праць ДЕТУТ. – 2017. – Вип. 30. – С. 113-122. – (Серія: Транспортні системи і технології).
4. Kuczek T. Topology Optimization of Railcar Composite Structure / T. Kuczek, B. Szachniewicz // OPT-i 2014 – 1st International Conference on Engineering and Applied Sciences Optimization, Proceedings. – 2014. – Pp. 1-9. – Mode of access: <https://doi.org/10.1504/IJHVS.2015.073206>.
5. Бейн Д.Г. Анализ напряженного состояния несущего настила пола четырехосного полувагона с глухим кузовом / Д.Г. Бейн // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2011. – № 1(29). – С. 47-51.
6. Structural-optimization-based design process for the body of a railway vehicle made from extruded aluminum panels / Hyun-Ah Lee, Seong-Beom Jung, Hwan-Hak Jang, Dae-Hwan Shin, Jang Uk Lee, Kwang Woo Kim and Gyung-Jin Park // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. – 2016. – Vol. 230, iss. 4. – Pp. 1283-1296. – Mode of access: <https://doi.org/10.1177/0954409715593971>.
7. Substantiating the optimization of the loadbearing structure of a hopper car for transporting pellets and hot agglomerate / O. Fomin, A. Lovska, I. Skliarenko, Yu. Klochov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2020. – № 1/7(103) – Pp. 65-74. – Mode of access: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.193408>.
8. Determination of the dynamic load of the carrying structure of the hopper wagon with the actual dimensions of structural elements / O. Fomin, A. Lovska, P. Skok, I. Rogovskii // Technology audit and production reserves. – 2021. – № 1/1(57). – Pp. 6-11. – Mode of access: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.225458>.
9. Lovska A. A new fastener to ensure the reliability of a passenger coach car body on a railway ferry / A. Lovska, O. Fomin // Acta Polytechnica. – 2020. – Vol. 60, iss. 6. – Pp. 478-485. – Mode of access: <https://doi.org/10.14311/AP.2020.60.0478>.

10. Dynamic load modelling within combined transport trains during transportation on a railway ferry / A. Lovska, O. Fomin, V. Píštěk, P. Kučera // *Applied Science*. – 2020. – №10, 5710. – Pp. 1-15. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/app10165710>.
11. Fomin O. Establishing patterns in determining the dynamics and strength of a covered freight car, which exhausted its resource / O. Fomin, A. Lovska // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2020. – Vol. 6, no. 7 (108). – Pp. 21-29. – Mode of access: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.217162>.
12. Rationalization of cross-sections of the composite reinforced concrete span structure of bridges with a monolithic reinforced concrete roadway slab / G.L. Vatulia, O.V. Lobiak, S.V. Deryzemlia, M.A. Verevicheva, Ye.F. Orel // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 664, 012014. – Pp. 1-9. – Mode of access: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/664/1/012014>.
13. Vatulia G. Optimization of the truss beam. Verification of the calculation results / G. Vatulia, S. Komagorova, M. Pavliuchenkov // *MATEC Web of Conferences*. – 2018. – Vol. 230, 02037. – Pp. 1-8. – Mode of access: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823002037>.
14. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). – Введ. 2015-07-01. – Київ, 2015. – 162 с.
15. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. – Введ. 2016-07-01. – М. : Стандартинформ, 2016. – 54 с.

References:

1. Lukin V.V., Shadur L.A., Koturanov V.I., Hohlov A.A., Anisimov P.S. *Konstruirovaniye i raschet vagonov* [Design and calculation of wagons]. Moscow, UMK MPS Rossii Publ., 2000. 731 p. (Rus.)
2. Putyato A.V., Konovalov E.N., Afanas'kov P.M. Prognozirovaniye ostatochnogo resursa vagona hopper-dozatora posle dlitel'noj ekspluatatsii s uchetom fakticheskikh fiziko-mekhanicheskikh harakteristik materiala nesushchej konstrukcii [Prediction of the residual life of a hopper-batcher car after long-term operation, taking into account the actual physical and mechanical characteristics of the material of the supporting structure]. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov – Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*, 2016, № 1(34), pp. 26-35. (Rus.)
3. Keбал Yu.V., Shatov V.A., T'okotev O.M., Murashova N.G. Udoskonalennya konstrukcii vagona-hopera dlya perevezennya zerna [Improved design of the hopper car for the transportation of grain]. *Zbirnik naukovih prac' DETUT. Seriya «Transportni sistemi i tekhnologii» – Collection of scientific works of SUIT «Transport systems and technologies»*, 2017, vol. 30, pp. 113-122. (Ukr.)
4. Kuczek T., Szachniewicz B. Topology Optimization of Railcar Composite Structure. *OPT-i 2014 – 1st International Conference on Engineering and Applied Sciences Optimization, Proceedings*, 2014, pp. 1-9. doi: 10.1504/IJHVS.2015.073206.
5. Bejn D.G. Analiz napryazhennogo sostoyaniya nesushchego nastila pola chetyrekhosnogo poluvagona s gluhim kuzovom [Analysis of the stress state of the load-bearing flooring of a four-axle gondola car with a solid body]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Bryansk State Technical University*, 2011, № 1(29), pp. 47-51. (Rus.)
6. Hyun-Ah Lee, Seong-Beom Jung, Hwan-Hak Jang, Dae-Hwan Shin, Jang Uk Lee, Kwang Woo Kim and Gyung-Jin Park. Structural-optimization-based design process for the body of a railway vehicle made from extruded aluminum panels. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2016, vol. 230, iss. 4, pp. 1283-1296. doi:10.1177/0954409715593971.
7. Fomin O., Lovska A., Skliarenko I., Klochkov Yu. Substantiating the optimization of the loadbearing structure of a hopper car for transporting pellets and hot agglomerate. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020, № 1/7(103), pp. 65-74. doi: 10.15587/1729-4061.2020.193408.
8. Fomin O., Lovska A., Skok P., Rogovskii I. Determination of the dynamic load of the carrying structure of the hopper wagon with the actual dimensions of structural elements. *Technology audit and production reserves*, 2021, № 1/1(57), pp. 6-11. doi: 10.15587/2706-5448.2021.225458.

9. Lovska A., Fomin O. A new fastener to ensure the reliability of a passenger coach car body on a railway ferry. *Acta Polytechnica*, 2020, vol. 60, iss. 6, pp. 478-485. doi: **10.14311/AP.2020.60.0478**.
10. Lovska A., Fomin O., Píštěk V., Kučera P. Dynamic load modelling within combined transport trains during transportation on a railway ferry. *Applied Science*, 2020, № 10, 5710, pp. 1-15. doi: **10.3390/app10165710**.
11. Fomin O., Lovska A. Establishing patterns in determining the dynamics and strength of a covered freight car, which exhausted its resource. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020, vol. 6, no. 7(108), pp. 21-29. doi: **10.15587/1729-4061.2020.217162**.
12. Vatulia G. L., Lobiak O. V., Deryzemlia S. V., Verevicheva M. A., Orel Ye. F. Rationalization of cross-sections of the composite reinforced concrete span structure of bridges with a monolithic reinforced concrete roadway slab. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 664, 012014, pp. 1-9. doi: **10.1088/1757-899X/664/1/012014**.
13. Vatulia G., Komagorova S., Pavliuchenkov M. Optimization of the truss beam. Verification of the calculation results. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 230, 02037, pp. 1-8. doi: **10.1051/mateconf/201823002037**.
14. DSTU 7598:2014. *Vagoni vantazhni. Zagalni vimogi do rozrahunkiv ta proektuvannya novih i modernizovanih vagoniv kolii 1520 mm (nesamohidnih)* [State standart 7598:2014. Vantage carriages. Large-scale projects to refurbishment and design of new and modernized wagons with a gauge of 1520 mm (non-self propelled)]. Kyiv, 2015. 162 p. (Ukr.)
15. GOST 33211-2014. *Vagony gruzovye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam* [State standart 33211-2014. Freight cars. Requirements for durability and dynamic qualities]. Moskva, Standartinform Publ., 2016. 54 p. (Rus.)

Рецензент: С.Ю. Сапронова
д-р техн. наук, професор, ДУІТ

Стаття надійшла 23.01.2022

УДК 656.25

doi: 10.32782/2225-6733.44.2022.11

© Болжеларський Я.В.¹, Джус В.С.², Джус О.В.³, Клецька О.В.⁴,
Кіріцева О.В.⁵

ОЦІНКА ВИМОГ ІНТЕРОПЕРАБЕЛЬНОСТІ ДО УКРАЇНСЬКИХ ВАГОНІВ- ЦИСТЕРН, ЯКІ ПРИЗНАЧЕНІ ДЛЯ ПЕРЕВЕЗЕННЯ НЕБЕЗПЕЧНИХ ВАНТАЖІВ ЗАЛІЗНИЧНИМ ТРАНСПОРТОМ

Забезпечення безпеки при перевезенні вантажів залізничним транспортом з мінімалізацією рівня ризиків є пріоритетним завданням сьогодення. Зроблен аналіз, який показує, що в Україні існують значні напрацювання в області удосконалення конструкції вагонів, їх динамічних характеристик і безпеки. Виробники залізничних вагонів прагнуть до збільшення кількості нового, якісного і технічно-досконалого

¹ канд. техн. наук, в.о. директора, Львівський інститут Українського державного університету науки і технологій, м. Львів, ORCID: 0000-0002-4787-1781, jarik762145@gmail.com

² канд. техн. наук, доцент, Львівський інститут українського державного університету науки і технологій, м. Львів, ORCID: 0000-0002-1787-4471, jvs1960lviv@gmail.com

³ зав. лабораторії, Львівський НДІ судових експертиз, м. Львів, ORCID: 0000-0002-7577-4049, djusov22@gmail.com

⁴ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-4682-860X, gurao@ukr.net

⁵ ст. викладач, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-2481-5883, evkiritseva@gmail.com

данні розрахункової схеми враховано температурний вплив від перевозимого вантажу на внутрішню поверхню кузова вагона-хопера. Результати розрахунку показали, що максимальні еквівалентні напруження в несучій конструкції вагона-хопера становлять близько 340 МПа і зосереджені в зоні взаємодії хребтової балки зі шворневою. Максимальні напруження в несучій конструкції вагона-хопера, які зумовлені температурним навантаженням виникають у вертикальних стійках та горбиль і складають 335 МПа, що на 3% нижче за напруження плинності матеріалу конструкції. Визначено вплив температурного навантаження на показники міцності несучої конструкції вагона-хопера. Встановлено, що дана залежність є лінійною. Максимальні еквівалентні напруження при температурі перевозимого вантажу у 700°C майже дорівнюють межі плинності матеріалу конструкції. При незначному збільшенні температурного впливу на несучу конструкцію її показники міцності не будуть забезпечуватися. Тому виникає необхідність удосконалення несучої конструкції вагона-хопера для забезпечення його міцності в експлуатації. Проведені дослідження сприятимуть створенню напрацювань щодо проектування сучасних конструкцій вантажних вагонів з покращеними техніко-економічними показниками.

Ключові слова: транспортна механіка, вагон-хопер, несуча конструкція, міцність, навантаженість кузова, температурний вплив.

O.V. Fomin, A.O. Lovska, S.S. Sova, A.S. Lytvynenko. *Computer modeling of the temperature resistance of the load-bearing structure of the hopper car.* This article describes the results of computer modeling of temperature resistance of the hopper car load-bearing structure. For this purpose, a spacious model of load-bearing structure of an opera-car in SolidWorks program complex was created. As a prototype the hopper car model 20-9749 was used, which was built by "Ukrspetsvagon" and is intended for transportation of pellets and hot sinter. Calculation of the strength of the load-bearing structure of the operating car was carried out by the method of concatenated elements, which is implemented in the program complex CosmosWorks. When creating the design scheme, the temperature impact of the transported cargo on the inner surface of the hopper body was taken into account. The results of the calculation showed that the maximum equivalent loads in the load-bearing structure of the hopper car is about 340 MPa and is located in the area of interaction between the backbone beam with the kingpin. The maximum load in the load-bearing structure of the opera-car, which is caused by temperature pressure, occurs in the vertical struts and hump and amounts to 335 MPa, which is 3% lower than the load of the plinth of the material of the structure. The influence of temperature load on the indicators of load-bearing capacity of opera-car structure has been determined. It was found that this dependence is linear. The maximum equivalent loads at a temperature of transported cargo at 700°C are more or less equal to the plinth of the material of the structure. With a slight increase in the temperature impact on the supporting structure of its strength indicators will not be ensured. Therefore, there is a need to improve the load-bearing structure of the opera car to ensure its durability in operation. The conducted research will contribute to the creation of guidelines for the design of modern designs of freight cars with improved technical and economical indicators.

Key words: transport mechanics, hopper car, load-bearing structure, strength, body load, temperature influence.

Постановка проблеми. Забезпечення плідного функціонування транспортної галузі зумовлює необхідність впровадження в експлуатацію сучасних транспортних засобів. Оскільки основний сегмент перевізного процесу відводиться залізничному транспорту, то до створення сучасних конструкцій вагонів повинні перед'являтися особливі вимоги.

Одним з найбільш поширених типів вагонів, які експлуатуються на коліях промислових підприємств є вагони-хопери для перевезення гарячого агломерату з температурою не вище 700°C, а також сипучих матеріалів (щебінь, пісок, вугілля, керамзит), які не потребують захисту

від атмосферних опадів [1]. Особливістю цих вагонів є те, що обшивка бокових стін не приварюється до стійок, а навішується на каркас.

Важливим напрямком розвитку питань створення перспективних вагонів-хоперів є оптимізація їх кузовів. Це дозволило б здійснити зменшення їх матеріалоемності при дотриманні вантажопідйомності не нижче до відповідних конструкцій вагонів-прототипів. Таке рішення сприятиме зменшенню витрат на виготовлення вагонів, їх експлуатацію, а також підвищенню ефективності перевізного процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Прогнозування залишкового ресурсу вагона хопер-дозатора після тривалої експлуатації з урахуванням фактичних фізико-механічних характеристик матеріалу несучих конструкцій проводиться у роботі [2]. Приведені результати віртуальних та експериментальних досліджень міцності несучої конструкції вагона.

Особливості удосконалення конструкції вагона-хопера для перевезення зерна висвітлюються у публікації [3]. Можливість оптимізації елементів кузова вагона проведено за аналізом найбільш характерних вузлів і конструктивних ознак спеціалізованих бункерних вагонів для перевезення сипучих вантажів. Тобто враховано досвід експлуатації окремих складових кузова з подальшою інтеграцією у нову конструкцію. Однак в розглянутих роботах при проведенні розрахунків на міцність несучих конструкцій вагонів не враховано температурного впливу на їх складові.

В роботі [4] наведені особливості топологічної оптимізації кузова вагона. При цьому використано комп'ютерне моделювання з застосуванням методу скінчених елементів. Результати досліджень підтвердили ефективність використання запропонованої методології для кузовів вагонів. При цьому у якості прикладу розрахунок проведений для кузова пасажирського вагона. Стосовно несучої конструкції вагона-хопера, як найбільш навантаженого типу вагона в експлуатації, дана методика не використовувалася.

Питання оптимізації кузовів вантажних вагонів відкритого типу з несучою підлогою висвітлені у роботі [5]. Розроблений алгоритм сумісної структурної та параметричної оптимізації бокової стіни та рами напіввагона з несучою підлогою під осьове навантаження 25 т/вісь. Разом з цим питання визначення температурного впливу на несучу конструкцію вагона в роботі не проводилося.

Структурно-оптимізаційна концепція створення кузова вагона з алюмінієвих панелей висвітлюється у публікації [6]. Особливістю панелей є те, що вони виготовлені по типу "сандвіч". Характеристична функція пошуку оптимальної комбінації визначена максимальними напруженнями та зміщеннями.

В роботах [7, 8] проведено визначення навантаженості несучої конструкції вагона-хопера при експлуатаційних режимах. Запропоновано заходи щодо підвищення ефективності експлуатації вагона-хопера. Однак при проведенні розрахунків на міцність авторами не враховано температурного впливу на складові несучої конструкції.

Аналіз літературних джерел [2-8] дозволяє зробити висновок, що питанням визначення температурного впливу на несучу конструкцію вагона-хопера не приділялося належної уваги. Це зумовлює необхідність проведення відповідних досліджень в цьому напрямку.

Метою дослідження є визначення залежності максимальних еквівалентних напружень в несучій конструкції вагона-хопера від температурного впливу перевозимого у ньому вантажу. Для досягнення зазначеної мети поставлені такі завдання:

- провести розрахунок на міцність несучої конструкції вагона-хопера з урахуванням температурного впливу на його складові;
- визначити вплив температурного навантаження на максимальні еквівалентні напруження в несучій конструкції вагона-хопера.

Виклад основного матеріалу. Для визначення температурної навантаженості несучої конструкції вагона-хопера проведено розрахунок за методом скінчених елементів. Для цього побудовано його просторову модель в програмному комплексі SolidWorks. У якості вагона-прототипу обраний вагон-хопер моделі 20-9749, побудови ДП «Укрспецвагон» (Україна).

Просторову геометричну модель несучої конструкції вагона-хопера наведено на рис. 1.

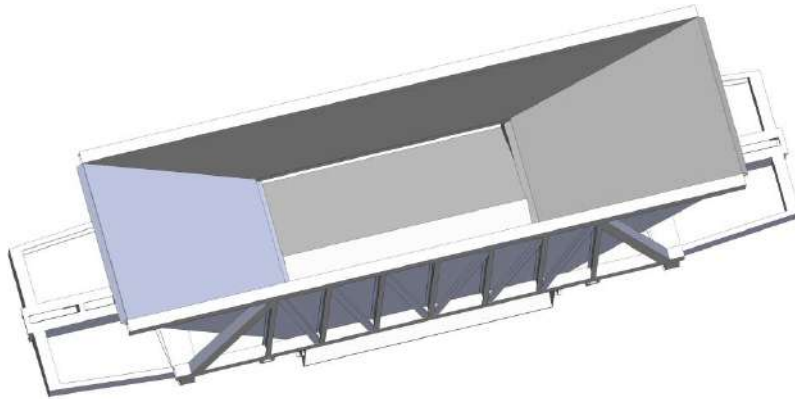


Рис. 1 – Просторова модель несучої конструкції вагона-хопера

Розрахунок реалізований в середовищі програмного комплексу CosmosWorks [9-11]. При складанні скінчено-елементної моделі враховані ізопараметричні тетраедри. Оптимальна кількість елементів моделі визначена за графоаналітичним методом [12, 13]. Кількість вузлів моделі склала 126221, елементів – 376670. Максимальний розмір елемента склав 60 мм, а мінімальний – 12 мм. Відсоток елементів з співвідношенням боків менше трьох – 7,43. Відсоток елементів з співвідношенням боків більше десяти – 32,5. Мінімальна кількість елементів в колі склала 9, співвідношення збільшення розміру елементів – 1,6.

Розрахункова схема несучої конструкції вагона-хопера при найбільш несприятливому експлуатаційному режимі – маневрове співударяння, наведена на рис. 2.

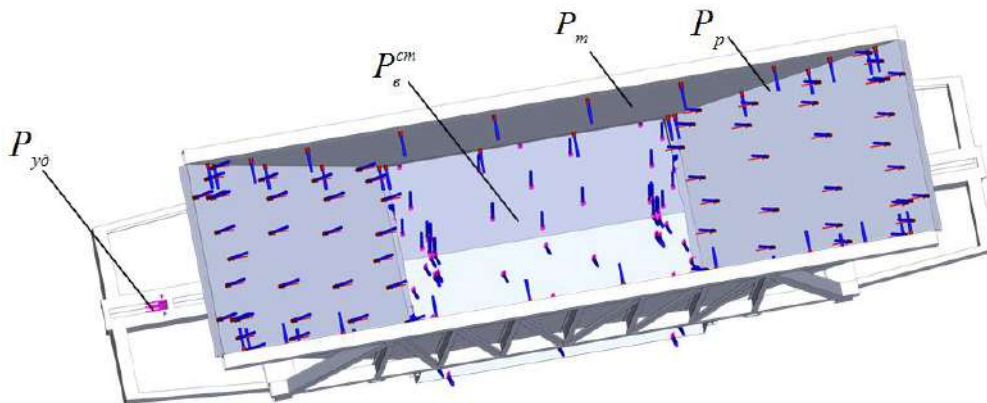


Рис. 2 – Розрахункова схема несучої конструкції вагона-хопера

Враховано, що на несучу конструкцію вагона діє вертикальне статичне навантаження $P_{ст}$. Також на конструкцію кузова діє тиск розпору від насипного вантажу P_p , чисельне значення якого знайдено за формулою (1). На вертикальну поверхню заднього упору діє ударне навантаження $P_{у0}$, чисельне значення якого відповідно до нормативних документів становить 3,5 МН [14, 15]. До внутрішніх поверхонь кузова прикладалося температурне навантаження P_m , яке дорівнює 700°C.

Активний тиск розпору насипного вантажу визначений за формулою [1]

$$P_a = \gamma \cdot g \cdot H \cdot tg^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right), \quad (1)$$

де γ – щільність насипного вантажу, т/м³;
 H – висота бокової стіни, м;
 φ – кут природнього відкосу вантажу, рад;
 g – прискорення вільного падіння, м/с².

Закріплення моделі здійснювалося в зонах обпирання кузова на ходові частини. Матеріал конструкції – сталь марки 09Г2С. Результати розрахунку наведені нижче (рис. 3, 4).

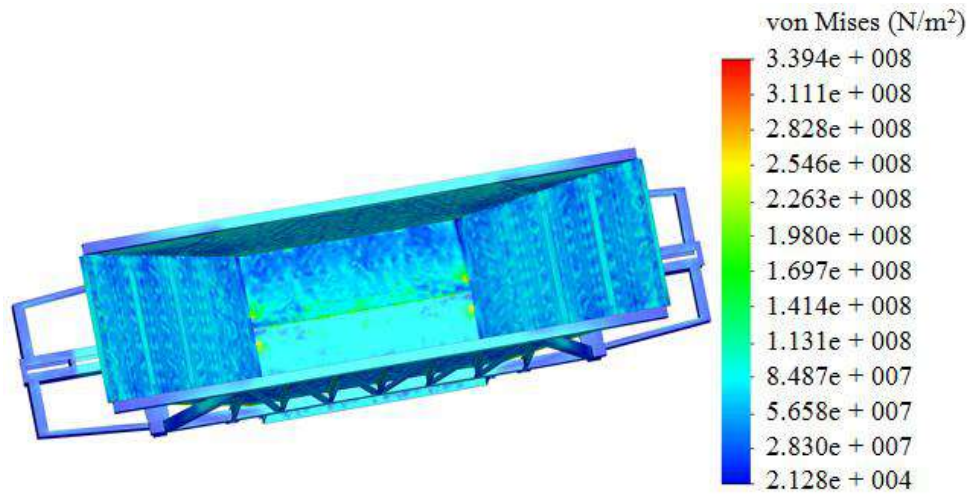


Рис. 3 – Напружений стан несучої конструкції вагона-хопера

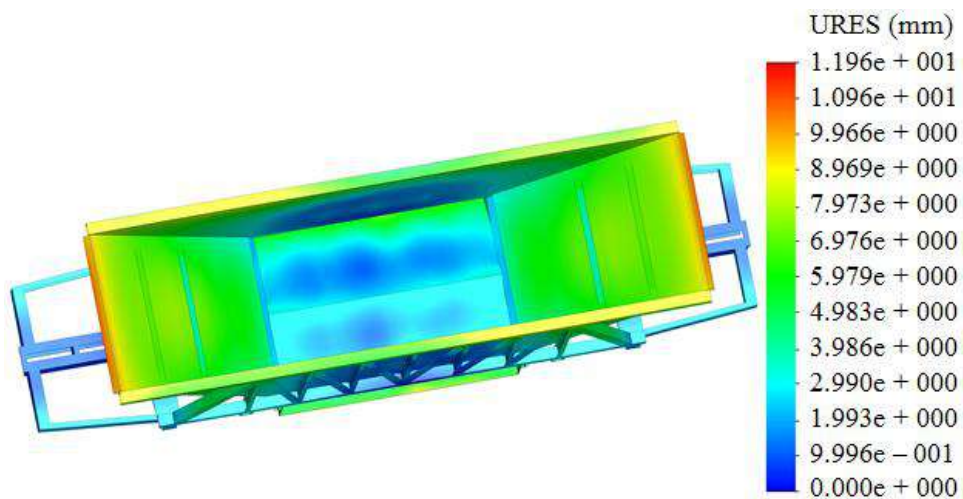


Рис. 4 – Переміщення в вузлах несучої конструкції вагона-хопера

Максимальні еквівалентні напруження в несучій конструкції вагона-хопера становлять близько 340 МПа і зосереджені в зоні взаємодії хребтової балки зі шворневою. Максимальні переміщення виникають в розвантажувальних бункерах, а також верхньому об'язуванні і складають близько 12,0 мм. Максимальні напруження в несучій конструкції вагона-хопера, які зумовлені температурним навантаженням виникають у вертикальних стійках та горбилі.

За розрахунковою схемою, наведеною на рис. 2, побудовано розподілення максимальних еквівалентних напружень за висотою стійки. Результати розрахунку наведено на рис. 5.

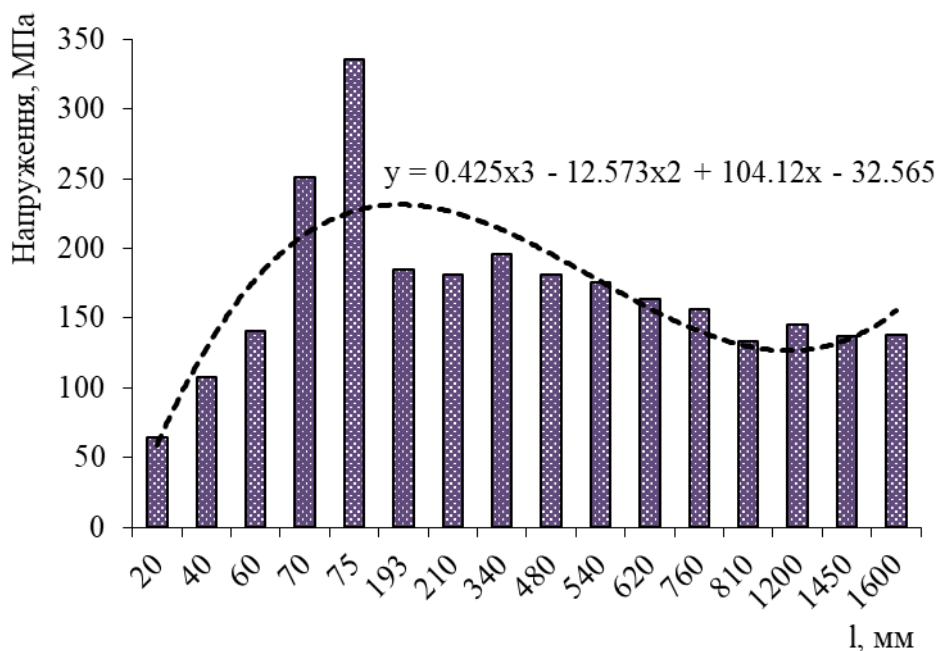


Рис. 5 – Розподілення максимальних еквівалентних напружень за висотою стійки вагона-хопера

При цьому максимальне еквівалентне напруження виникає ближче до нижньої частини стійки і складає 335 МПа, що на 3% нижче за напруження плинності матеріалу конструкції [14, 15].

На рис. 6 наведено залежність максимальних еквівалентних напружень в вертикальній стійці вагона-хопера від температурного впливу.

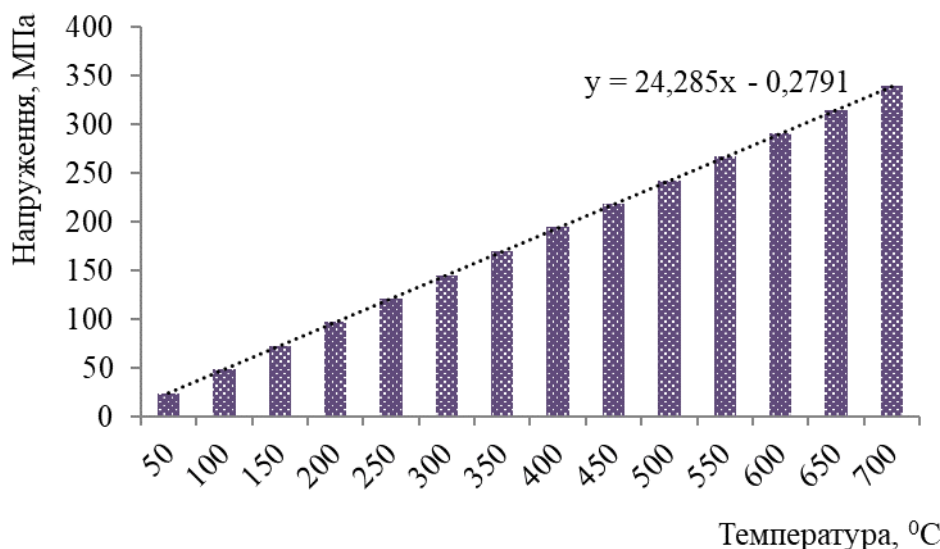


Рис. 6 – Залежність максимальних еквівалентних напружень в вертикальній стійці вагона-хопера від температурного впливу

З рис. 6 видно, що дана залежність є лінійною. При цьому напруження знімалися з найбільш навантаженої зони вертикальної стійки.

Максимальні еквівалентні напруження при температурі перевозимого вантажу у 700°C майже дорівнюють межі плинності матеріалу конструкції. При незначному збільшенні температурного впливу на несучу конструкцію її показники міцності не будуть

забезпечуватися. Це викликає необхідність створення заходів щодо забезпечення міцності складових несучої конструкції вагона-хопера. Наприклад, удосконалення несучої конструкції вагона-хопера шляхом виконання найбільш навантажених складових з термостійкого матеріалу.

Висновки

1. Проведено розрахунок на міцність несучої конструкції вагона-хопера з урахуванням температурного впливу на його складові. Встановлено, що максимальні еквівалентні напруження в несучій конструкції вагона-хопера становлять близько 340 МПа і зосереджені в зоні взаємодії хребтової балки зі шворневою.

Максимальні напруження в несучій конструкції вагона-хопера, які зумовлені температурним навантаженням виникають у вертикальних стійках та горбилі і складають 335 МПа, що на 3% нижче за напруження плинності матеріалу конструкції.

2. Визначено вплив температурного навантаження на максимальні еквівалентні напруження в несучій конструкції вагона-хопера. Встановлено, що дана залежність є лінійною. Максимальні еквівалентні напруження при температурі перевозимого вантажу у 700°C майже дорівнюють межі плинності матеріалу конструкції. При незначному збільшенні температурного впливу на несучу конструкцію її показники міцності не будуть забезпечуватися. Тому виникає необхідність удосконалення несучої конструкції вагона-хопера для забезпечення його міцності в експлуатації.

Проведені дослідження сприятимуть створенню напрацювань щодо проектування сучасних конструкцій вантажних-вагонів з покращеними техніко-економічними показниками.

Перелік використаних джерел:

1. Конструирование и расчет вагонов / В.В. Лукин, Л.А. Шадур, В.И. Котуранов, А.А. Хохлов, П.С. Анисимов. – М. : УМК МПС России, 2000. – 731 с.
2. Путятю А.В. Прогнозирование остаточного ресурса вагона хоппер-дозатора после длительной эксплуатации с учетом фактических физико-механических характеристик материала несущей конструкции / А.В. Путятю, Е.Н. Коновалов, П.М. Афанаськов // Механика машин, механизмов и материалов. – 2016. – № 1(34). – С. 26-35.
3. Удосконалення конструкції вагона-хопера для перевезення зерна / Ю.В. Кебал, В.А. Шатов, О.М. Тьокотев, Н.Г. Мурашова // Збірник наукових праць ДЕТУТ. – 2017. – Вип. 30. – С. 113-122. – (Серія: Транспортні системи і технології).
4. Kuczek T. Topology Optimization of Railcar Composite Structure / T. Kuczek, B. Szachniewicz // OPT-i 2014 – 1st International Conference on Engineering and Applied Sciences Optimization, Proceedings. – 2014. – Pp. 1-9. – Mode of access: <https://doi.org/10.1504/IJHVS.2015.073206>.
5. Бейн Д.Г. Анализ напряженного состояния несущего настила пола четырехосного полувагона с глухим кузовом / Д.Г. Бейн // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2011. – № 1(29). – С. 47-51.
6. Structural-optimization-based design process for the body of a railway vehicle made from extruded aluminum panels / Hyun-Ah Lee, Seong-Beom Jung, Hwan-Hak Jang, Dae-Hwan Shin, Jang Uk Lee, Kwang Woo Kim and Gyung-Jin Park // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. – 2016. – Vol. 230, iss. 4. – Pp. 1283-1296. – Mode of access: <https://doi.org/10.1177/0954409715593971>.
7. Substantiating the optimization of the loadbearing structure of a hopper car for transporting pellets and hot agglomerate / O. Fomin, A. Lovska, I. Skliarenko, Yu. Klochkov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2020. – № 1/7(103) – Pp. 65-74. – Mode of access: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.193408>.
8. Determination of the dynamic load of the carrying structure of the hopper wagon with the actual dimensions of structural elements / O. Fomin, A. Lovska, P. Skok, I. Rogovskii // Technology audit and production reserves. – 2021. – № 1/1(57). – Pp. 6-11. – Mode of access: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.225458>.
9. Lovska A. A new fastener to ensure the reliability of a passenger coach car body on a railway ferry / A. Lovska, O. Fomin // Acta Polytechnica. – 2020. – Vol. 60, iss. 6. – Pp. 478-485. – Mode of access: <https://doi.org/10.14311/AP.2020.60.0478>.

10. Dynamic load modelling within combined transport trains during transportation on a railway ferry / A. Lovska, O. Fomin, V. Píštěk, P. Kučera // *Applied Science*. – 2020. – №10, 5710. – Pp. 1-15. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/app10165710>.
11. Fomin O. Establishing patterns in determining the dynamics and strength of a covered freight car, which exhausted its resource / O. Fomin, A. Lovska // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2020. – Vol. 6, no. 7 (108). – Pp. 21-29. – Mode of access: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.217162>.
12. Rationalization of cross-sections of the composite reinforced concrete span structure of bridges with a monolithic reinforced concrete roadway slab / G.L. Vatulia, O.V. Lobiak, S.V. Deryzemlia, M.A. Verevicheva, Ye.F. Orel // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 664, 012014. – Pp. 1-9. – Mode of access: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/664/1/012014>.
13. Vatulia G. Optimization of the truss beam. Verification of the calculation results / G. Vatulia, S. Komagorova, M. Pavliuchenkov // *MATEC Web of Conferences*. – 2018. – Vol. 230, 02037. – Pp. 1-8. – Mode of access: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823002037>.
14. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). – Введ. 2015-07-01. – Київ, 2015. – 162 с.
15. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. – Введ. 2016-07-01. – М. : Стандартинформ, 2016. – 54 с.

References:

1. Lukin V.V., Shadur L.A., Koturanov V.I., Hohlov A.A., Anisimov P.S. *Konstruirovaniye i raschet vagonov* [Design and calculation of wagons]. Moscow, UMK MPS Rossii Publ., 2000. 731 p. (Rus.)
2. Putyato A.V., Konovalov E.N., Afanas'kov P.M. Prognozirovaniye ostatochnogo resursa vagona hopper-dozatora posle dlitel'noj ekspluatatsii s uchetom fakticheskikh fiziko-mekhanicheskikh harakteristik materiala nesushchej konstrukcii [Prediction of the residual life of a hopper-batcher car after long-term operation, taking into account the actual physical and mechanical characteristics of the material of the supporting structure]. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov – Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*, 2016, № 1(34), pp. 26-35. (Rus.)
3. Keбал Yu.V., Shatov V.A., T'okotev O.M., Murashova N.G. Udoskonalennya konstrukcii vagona-hopera dlya perevezennya zerna [Improved design of the hopper car for the transportation of grain]. *Zbirnik naukovih prac' DETUT. Seriya «Transportni sistemi i tekhnologii» – Collection of scientific works of SUIT «Transport systems and technologies»*, 2017, vol. 30, pp. 113-122. (Ukr.)
4. Kuczek T., Szachniewicz B. Topology Optimization of Railcar Composite Structure. *OPT-i 2014 – 1st International Conference on Engineering and Applied Sciences Optimization, Proceedings*, 2014, pp. 1-9. doi: 10.1504/IJHVS.2015.073206.
5. Bejn D.G. Analiz napryazhennogo sostoyaniya nesushchego nastila pola chetyrekhosnogo poluvagona s gluhim kuzovom [Analysis of the stress state of the load-bearing flooring of a four-axle gondola car with a solid body]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Bryansk State Technical University*, 2011, № 1(29), pp. 47-51. (Rus.)
6. Hyun-Ah Lee, Seong-Beom Jung, Hwan-Hak Jang, Dae-Hwan Shin, Jang Uk Lee, Kwang Woo Kim and Gyung-Jin Park. Structural-optimization-based design process for the body of a railway vehicle made from extruded aluminum panels. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2016, vol. 230, iss. 4, pp. 1283-1296. doi:10.1177/0954409715593971.
7. Fomin O., Lovska A., Skliarenko I., Klochkov Yu. Substantiating the optimization of the loadbearing structure of a hopper car for transporting pellets and hot agglomerate. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020, № 1/7(103), pp. 65-74. doi: 10.15587/1729-4061.2020.193408.
8. Fomin O., Lovska A., Skok P., Rogovskii I. Determination of the dynamic load of the carrying structure of the hopper wagon with the actual dimensions of structural elements. *Technology audit and production reserves*, 2021, № 1/1(57), pp. 6-11. doi: 10.15587/2706-5448.2021.225458.

9. Lovska A., Fomin O. A new fastener to ensure the reliability of a passenger coach car body on a railway ferry. *Acta Polytechnica*, 2020, vol. 60, iss. 6, pp. 478-485. doi: **10.14311/AP.2020.60.0478**.
10. Lovska A., Fomin O., Píštěk V., Kučera P. Dynamic load modelling within combined transport trains during transportation on a railway ferry. *Applied Science*, 2020, № 10, 5710, pp. 1-15. doi: **10.3390/app10165710**.
11. Fomin O., Lovska A. Establishing patterns in determining the dynamics and strength of a covered freight car, which exhausted its resource. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020, vol. 6, no. 7(108), pp. 21-29. doi: **10.15587/1729-4061.2020.217162**.
12. Vatulia G. L., Lobiak O. V., Deryzemlia S. V., Verevicheva M. A., Orel Ye. F. Rationalization of cross-sections of the composite reinforced concrete span structure of bridges with a monolithic reinforced concrete roadway slab. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 664, 012014, pp. 1-9. doi: **10.1088/1757-899X/664/1/012014**.
13. Vatulia G., Komagorova S., Pavliuchenkov M. Optimization of the truss beam. Verification of the calculation results. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 230, 02037, pp. 1-8. doi: **10.1051/mateconf/201823002037**.
14. DSTU 7598:2014. *Vagoni vantazhni. Zagalni vimogi do rozrahunkiv ta proektuvannya novih i modernizovanih vagoniv kolii 1520 mm (nesamohidnih)* [State standart 7598:2014. Vantage carriages. Large-scale projects to refurbishment and design of new and modernized wagons with a gauge of 1520 mm (non-self propelled)]. Kyiv, 2015. 162 p. (Ukr.)
15. GOST 33211-2014. *Vagony gruzovye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam* [State standart 33211-2014. Freight cars. Requirements for durability and dynamic qualities]. Moskva, Standartinform Publ., 2016. 54 p. (Rus.)

Рецензент: С.Ю. Сапронова
д-р техн. наук, професор, ДУІТ

Стаття надійшла 23.01.2022

УДК 656.25

doi: 10.32782/2225-6733.44.2022.11

© Болжеларський Я.В.¹, Джус В.С.², Джус О.В.³, Клецька О.В.⁴,
Кіріцева О.В.⁵

ОЦІНКА ВИМОГ ІНТЕРОПЕРАБЕЛЬНОСТІ ДО УКРАЇНСЬКИХ ВАГОНІВ- ЦИСТЕРН, ЯКІ ПРИЗНАЧЕНІ ДЛЯ ПЕРЕВЕЗЕННЯ НЕБЕЗПЕЧНИХ ВАНТАЖІВ ЗАЛІЗНИЧНИМ ТРАНСПОРТОМ

Забезпечення безпеки при перевезенні вантажів залізничним транспортом з мінімалізацією рівня ризиків є пріоритетним завданням сьогодення. Зроблен аналіз, який показує, що в Україні існують значні напрацювання в області удосконалення конструкції вагонів, їх динамічних характеристик і безпеки. Виробники залізничних вагонів прагнуть до збільшення кількості нового, якісного і технічно-досконалого

¹ канд. техн. наук, в.о. директора, Львівський інститут Українського державного університету науки і технологій, м. Львів, ORCID: 0000-0002-4787-1781, jarik762145@gmail.com

² канд. техн. наук, доцент, Львівський інститут українського державного університету науки і технологій, м. Львів, ORCID: 0000-0002-1787-4471, jvs1960lviv@gmail.com

³ зав. лабораторії, Львівський НДІ судових експертиз, м. Львів, ORCID: 0000-0002-7577-4049, djusov22@gmail.com

⁴ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-4682-860X, gurao@ukr.net

⁵ ст. викладач, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-2481-5883, evkiritseva@gmail.com

(за умовами інтероперабельності) залізничного рухомого складу який експлуатується. Були розглянуті 11 специфікацій інтероперабельності: інфраструктура; енергія; управління; шум; особи з обмеженою мобільністю; безпека в тунелях; вантажні вагони; локомотиви, пасажирські вагони і моторвагонний рухомий склад; телематика вантажоперевезень; телематика пасажирських перевезень; рух поїздів, які затверджені і діють на даний час. Розглянуті вимоги та компоненти Технічної сертифікації інтероперабельності і вітчизняних нормативних документів до залізничних вагонів, а саме: вимоги Технічної сертифікації інтероперабельності до вантажних залізничних вагонів; вимоги нормативних документів в Україні щодо вагонів-цистерн; технічні характеристики вагонів-цистерн, які виробляються в Україні. Зроблено порівняльний аналіз відповідності загальних технічних параметрів вагонів-цистерн, які виробляються в Україні, принципу дії та конструкції гальмівних систем вантажних вагонів, відповідності габариту вагонів-цистерн щодо визначення габариту рухомого складу залізниці (або габариту рухомого складу), виконання умов, при яких можливий схід рухомого складу. Проведені розрахунки для порожнього вагона при наявності підвищення зовнішньої рейки, також зроблені розрахунки критеріїв безпеки руху за даними нормами. Врахування вимог щодо виробництва сучасного рухомого складу є необхідністю, яка розглянута на прикладі вагонів-цистерн, що випускаються в даний час на відповідність вимогам інтероперабельності та запропоновані першочергові заходи щодо досягнення вказаної відповідності.

Ключові слова: залізничний транспорт, рухомий склад, безпека при перевезенні вантажів, конструкція вагонів.

Y. Bolzhelarskyi, V. Dzhus, O. Dzhus, O.V. Kletska, O.V. Kiritseva. Evaluation of interoperability to Ukrainian tank cars, as they are recognized for the transportation of non-healthy cargoes by railway transport. Ensuring safety during the transportation of goods by railway transport with the minimization of the level of risks is a priority task today. An analysis was made that shows that in Ukraine there are significant developments in the field of improving the design of wagons, their dynamic characteristics and safety. Manufacturers of railway cars strive to increase the number of new, high-quality and technically advanced (under the terms of interoperability) railway rolling stock in use. 11 interoperability specifications were considered: infrastructure; energy; management; noise; persons with limited mobility; safety in tunnels; freight cars; locomotives, passenger cars and rolling stock; freight transportation telematics; passenger transportation telematics; the movement of trains that are approved and currently in operation. The considered requirements and components of the Technical Certification of Interoperability and domestic normative documents for railway cars, namely: the requirements of the Technical Certification of Interoperability for freight railway cars; requirements of regulatory documents in Ukraine regarding tank cars; technical characteristics of tank cars produced in Ukraine. A comparative analysis was made of the conformity of the general technical parameters of tank cars manufactured in Ukraine, the principle of operation and design of brake systems of freight cars, the conformity of the dimensions of tank cars, regarding the determination of the dimensions of railway rolling stock (or the dimensions of rolling stock), the fulfillment of conditions under which it is possible the east of the rolling stock. Calculations were made for an empty car in the presence of a raised outer rail, as well as calculations of traffic safety criteria according to these standards. Taking into account the requirements for the production of modern rolling stock is a necessity, which is considered on the example of tank cars, which are currently produced for compliance with interoperability requirements, and the proposed priority measures to achieve the specified compliance.

Key words: railroad transport, rolling stock, safety during cargo transportation, construction of wagons.

Постановка проблеми. Залізничні вагони-цистерни відносяться до вузькоспеціалізованого рухомого складу, який призначений для перевезення наливних вантажів: харчових продуктів, зріджених газів, хімічно-активних й агресивних рідких речовин, а також порошкоподібних матеріалів. Їх використання для перевезення зазначених вантажів є очевидним і при цьому забезпечує скорочення технологічного часу на технічний і комерційний огляд поїздів, підвищує, порівняно з іншими видами рухомого складу при зазначеній номенклатурі вантажів, безпеку транспортування вантажів які потребують особливих умов перевезення – зменшується ризик втрати і виліву вантажів, чи навіть настання залізнично-транспортної пригоди з можливими значними наступними збитками від цього [1]. Парк вагонів-цистерн постійно оновлюється, а витрати на їхнє виготовлення є затратними і вимірюються десятками мільйонів гривень. Тому виробництво сучасних вагонів-цистерн для України має велике значення.

На Україні основними виробниками вагонів є Крюківський вагонобудівний завод, «Дніпровагонмаш», ДМЗ «Карпати», «Азоввагон», «Полтавхиммаш та інші [2].

Однак в умовах відкритої конкуренції, особливо з підприємствами країн ЄС, українські підприємства можуть бути усунені з ринку європейськими виробниками рухомого складу, які вже на теперішній час в своїй роботі використовують принципи інтеперабельності. Недопущення зазначеної ситуації визначає актуальність зазначеної роботи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз існуючих напрацювань, які присвячені проблемі розвитку, в частині виготовлення парку сучасних вантажних вагонів, показав, що в Україні існують значні напрацювання в області удосконалення конструкції вагонів, їх динамічних характеристик і безпеки. Основні наукові роботи в цій області велись на АТ «Азовмаш», ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», ННІ «Дніпропетровський інститут інфраструктури і транспорту», Крюківському вагонобудівному заводі та інших організаціях [3-14]. В результаті проведеної роботи виявлено, що у сфері гармонізації технічної і нормативної документації України і ЄС з виготовлення сучасних вагонів приділяється недостатня увага.

Оскільки в Україні виробники вагонів досить сильно підійшли до вимог, без виконання яких ринок ЄС буде їм недоступний, а можливість використання їхніх вагонів буде сумнівною перспективою. Існують перш початкові підходи до виправлення перешкод для сумісного функціонування залізничних систем і скорочення часу, який необхідний для прийняття Технічної сертифікації інтеперабельності (ТСІ), але необхідно активніше використовувати існуючі можливості, щоб виключити ситуації, коли країни-члени Європейського Союзу (ЄС) приймають нові національні правила чи здійснюють проекти, які збільшують різноманітність існуючої системи.

Щоб усунути перешкоди для функціональної сумісності та, як наслідок, розширити сферу застосування ТСІ на усю залізничну систему ЄС, обсяг національних правил слід поступово скорочувати. Національні правила, які конкретно відносяться до існуючих систем, слід відрізняти від тих, які необхідні для розробки недостатньо розкритих моментів в ТСІ.

Зазначені положення необхідно обов'язково враховувати при розробці нормативних документів Укрзалізниці, оскільки Україна підписала асоціацію з ЄС і Директиви [15, 16] неодмінно будуть застосовані на залізничному транспорті України.

В даний час затверджені і діють 11 специфікацій інтеперабельності: інфраструктура; енергія; управління; шум; особи з обмеженою мобільністю; безпека в тунелях; вантажні вагони; локомотиви, пасажирські вагони і моторвагонний рухомий склад; телематика вантажоперевезень; телематика пасажирських перевезень; рух поїздів. Слід зазначити, що взаємозв'язки між окремими ТСІ і підсистемами є складними: одна підсистема може бути описана в кількох ТСІ, а в свою чергу, декілька ТСІ можуть описувати одну підсистему. Для розкриття вище зазначених питань інтеперабельності при експлуатації вагонів-цистерн, які виробляються на в Україні встановлено, що в даний час випускається понад 15 моделей цистерн, для більшості з яких задекларована можливість експлуатації на залізницях ЄС. Зазначені вагони являються об'єктами дослідження в області специфікації інтеперабельності – вантажні вагони.

Метою дослідження є забезпечення безпеки при перевезенні вантажів залізничним транспортом, а саме вагонів-цистерн, з мінімізацією рівня ризиків.

Виклад основного матеріалу. *Розгляд вимог ТСІ і вітчизняних нормативних документів до залізничних вагонів.* Директива [16] визначає основні вимоги безпеки, належності, доступності та технічної сумісності для всіх компонентів інтероперабельності. Розглянемо ті з них, які стосуються вантажних вагонів.

Параметри, що відносяться до контакту колесо-рейка, повинні відповідати вимогам стабільності, необхідним для забезпечення безпечного руху на максимальній дозволений швидкості. Параметри гальмівного обладнання повинні гарантувати можливість їх зупинки в межах заданого гальмівного шляху з максимально дозволеною швидкістю. Методи гальмування та гальмівні сили повинні бути сумісні при проектуванні колії, інженерних споруд і систем сигналізації.

Компоненти, які використовуються повинні витримувати будь-які технічно визначені або виняткові навантаження, зазначені протягом терміну їх служби. Наслідки випадкових відмов щодо забезпечення безпеки їхньої експлуатації повинні бути обмежені відповідними засобами.

Конструкція особливо важливого обладнання, а також обладнання для руху, тяги і гальмування, системи команд управління в разі погіршення ситуації повинні бути такими, щоб поїзд міг продовжувати рух без негативного впливу на обладнання, яке залишилося в працездатному стані та без шкідливого впливу на екологію.

Моніторинг та технічне обслуговування нерухомих або рухомих компонентів, які задіяні в русі поїздів, повинні бути організовані, проведені і кількісно визначені таким чином, щоб підтримувати їх працездатність за визначених умов. Матеріали, які становлять небезпеку для здоров'я тих, хто має до них доступ, не повинні використовуватися в поїздах і залізничній інфраструктурі. Вплив при виготовленні і та експлуатації залізничної системи на навколишнє середовище повинно оцінюватися та обліковуватися на етапі проектування системи відповідно до законодавства Європейського Союзу.

Матеріали, які використовують виробники вагонів, повинні запобігати викидам парів або газів, які є шкідливими і небезпечними для навколишнього середовища, особливо в разі пожежі.

Рухомий склад та його елементи повинні бути спроектовані і виготовлені таким чином, щоб були електромагнітно-сумісними з установками, обладнанням і мережами загального або приватного користування, з яким вони можуть взаємодіяти. Конструкція і експлуатація рухомого складу не повинні призводити до недопустимого рівня шуму, створюваного ними.

Технічні характеристики інфраструктури та стаціонарних установок повинні бути сумісні один з одним і з характеристиками поїздів, які будуть використовуватися в залізничній системі. Ця вимога включає в себе безпечну інтеграцію підсистеми транспортного засобу з інфраструктурою.

Якщо дотримуватися цих характеристик на певних ділянках мережі важко, то можуть бути реалізовані тимчасові рішення, що забезпечать їх сумісність в майбутньому.

Вимоги ТСІ до вантажних залізничних вагонів. Технічна специфікація інтероперабельності «Вантажні вагони» [17] діють на всій залізничній мережі ЄС. Вони не нав'язують конкретних технологій і технічних рішень, крім випадків, коли це строго необхідно для забезпечення сумісності залізничної системи ЄС.

ТСІ [17] застосовується до вантажних вагонів з максимальною конструкційною швидкістю меншою або рівною 160 км/год. і максимальним навантаженням на вісь, меншим або рівним 25 тс. ТСІ застосовується до вантажних вагонів, які призначені для експлуатації на одному або декількох наступних колій: 1435 мм, 1524 мм, 1600 мм і 1668 мм. ТСІ не повинен застосовуватися до вантажних вагонів, які працюють, в основному, на колії 1520 мм, яка іноді може експлуатуватися на колії 1524 мм. ТСІ застосовується до всього нового рухомого складу вантажних вагонів залізничної системи Європейського Союзу, а також до існуючого рухомого складу в наступних випадках:

- коли він оновлюється або модернізується;
- стосовно конкретних положень, таких, як ідентифікація осей в пункті або порядку технічного обслуговування.

ТСІ [17] охоплюють такі базові параметри вантажних вагонів: кінцеві зчеплення; внутрішні з'єднання між частинами одного вагона; міцність конструкції; цілісність вагона; габарит; сумісність з допустимим навантаженням на колію; сумісність з системами виявлення

поїздів; системи контролю стану буксових підшипників; безпеку проти сходу з рейок; динаміка вагона; конструкція рами візка; параметри колісних пар; параметри коліс; параметри осей; букси і підшипники; колісні пари змінної ширини колії; елементи, що забезпечують зміну відстані між колесами колісної пари; вимоги безпеки до гальм; загальні функціональні вимоги до гальм; характеристики робочих гальм; характеристики стоянкових гальм; теплове розсіювання в гальмах; протиюзний захист; вплив на навколишнє середовище; пожежна безпека; захист від ураження електричним струмом; пристрої для встановлення хвостового сигналу.

Оскільки експлуатація вагонів-цистерн передбачається на колії 1435 мм і вагон-цистерна являє собою цілісну металеву конструкцію, виключимо з розгляду вимоги до колісних пар (в тому числі до колісних пар змінної ширини), елементам, що забезпечує індивідуальну заміну колісних пар, з'єднання між частинами вагона а також умови навколишнього середовища і пожежну безпеку.

Слід також враховувати, що згідно з пунктом 7.3.2.1 ТСІ [17] для вагонів у сполученні між Польщею, Фінляндією і Швецією з одного боку і країною – не членом ЄС з шириною колії 1520 мм допускається застосування національних технічних правил країни ЄС.

Також в ТСІ [17] описані вимоги до:

– механічних частин вагонів і динамічних якостей: кінцева зчіпка, міцність конструкції, цілісність пристрою, габарит, сумісність з допустимим навантаженням на колію і з системами виявлення поїздів, систем контролю за буксовими підшипниками, безпеки сходу з рейок, динаміки вагона, конструкції рами візка, букси і підшипники, пристрої для встановлення хвостового сигналу, маркування;

– гальм і протиюзних пристроїв: вимоги безпеки до гальм, загальні функціональні вимоги до гальм, характеристики робочих і стоянкових гальм, теплове розсіювання в гальмах, протиюзна частина.

Вимоги нормативних документів в Україні щодо вагонів-цистерн. Основні вимоги до рухомого складу наведені в Правилах технічної експлуатації залізниць України (ПТЕ) [18]. Згідно ПТЕ, рухомий склад повинен утримуватися в експлуатації у справному стані, що забезпечує безперебійну роботу, безпеку руху, охорону праці та своєчасно проходити планово-попереджувальні види ремонту і технічного обслуговування.

Типи і основні характеристики нового рухомого складу, затверджуються в порядку, встановленому Міністерством інфраструктури України.

Технічне завдання на новозбудований рухомий склад, затверджується постачальником за узгодженням з Державною адміністрацією залізничного транспорту України, а креслення вузлів і деталей і технічні умови – за погодженням з відповідними департаментами Державної адміністрації залізничного транспорту України.

Всі елементи вагонів за міцністю, стійкістю і технічним станом мають забезпечувати безпечний і плавний рух поїздів з найбільшими швидкостями, встановленими Державною адміністрацією залізничного транспорту України. Вагони, що будуються, повинні забезпечувати безпечний і плавний рух з найбільшими конструкційними швидкостями перспективних локомотивів, призначених для обслуговування відповідних категорій поїздів. Вантажні вагони, що не мають перехідних площадок, повинні мати спеціальні підніжки і поручні. Вносити зміни в конструкції основних вузлів прийнятого в експлуатацію рухомого складу допускається в установленому порядку. Рухомий склад повинен відповідати вимогам габариту рухомого складу, встановленого Державним стандартом.

Заново побудований рухомий склад, а також той, що пройшов капітальний ремонт, до введення його в експлуатацію на залізниці, має бути випробуваний і прийнятий від заводу-постачальника в певному порядку Державною адміністрацією залізничного транспорту України. Цистерни, що використовуються для перевезення небезпечних вантажів, повинні мати сертифікати відповідності згідно зі статтею 6 Закону України "Про перевезення небезпечних вантажів".

Забороняється випускати в експлуатацію і допускати до руху в поїздах рухомий склад, що має несправності, які загрожують безпеці руху, порушують охорону праці, а також ставити в поїзди вантажні вагони, стан яких не забезпечує збереження вантажів, що перевозяться.

Вимоги до технічного стану рухомого складу, порядок його технічного обслуговування і ремонту, а також відправка його на заводи та депо для ремонту визначаються Державною

адміністрацією залізничного транспорту України. Система технічного обслуговування і ремонту рухомого складу, норми міжремонтних пробігів, порядок постановки в ремонт встановлюються Державною адміністрацією залізничного транспорту України.

Кожна одиниця рухомого складу повинна мати такі розпізнавальні чіткі знаки і написи: знак Державної адміністрації залізничного транспорту України, номер, табличку заводу-виробника із зазначенням місця будівництва, дати і місця проходження визначених видів ремонту, маса тари. Крім того, повинні бути нанесені такі написи: на вантажних вагонах – вантажопідйомність. Інші знаки і написи на рухомому складі та самохідному спеціальному рухомому складі наносяться у порядку, встановленому Державною адміністрацією залізничного транспорту України. На кожен вагон має вестись технічний паспорт (формуляр), що містить найважливіші технічні та експлуатаційні характеристики.

Технічні характеристики вагонів-цистерн які виробляються на Україні. В даний час українськими підприємствами розроблено та освоєно понад 15 моделей цистерн [4-6]. Основні технічні характеристики зазначених цистерн наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Технічні характеристики цистерн

Шифр моделі	Найменування	Вантажопідйомність, т, не більше	Об'єм, м ³	Маса тари, т	Габарит	ТУ	Срок служби, років	
15-1443-06	Вагон-цистерна для бензину та інших світлих нафтопродуктів	66,0	73,1	25,8	02-ВМ	ТУ 24.00.1285-82	32	
15-1443-14	Вагон-цистерна для хімічних вантажів	66,0	73,1	25,8			24	
15-1566-06	Вагон-цистерна для в'язких нафтопродуктів	66,0	73,1	27,0			32	
15-1566-07	Вагон-цистерна для в'язких нафтопродуктів і бітуму	65,0	73,1	27,6				
15-1754	Вагон-цистерна для нафтопродуктів	68,5	79,2	25,0				
15-1755	Вагон-цистерна для нафтопродуктів	68,0	86,5	25,8	1-ВМ	ТУ У 35.2-32258888-57:2005	30	
15-1755П	Вагон-цистерна для рослинних масел	68,0	86,5	25,8				
15-1613-02	Вагон-цистерна для карбамідоформальдегіду смоли (КФС)	68,4	54,5	23,9	02-ВМ	ТУ 24.00.6211-87	24	
15-1613-03	Вагон-цистерна для карбамідоформальдегіду смоли (КФС)	67,5	54,5	25,7	02-ВМ	ТУ 24.00.507-87	24	
15-1424-02	Вагон-цистерна для олеума	68	38,5±0,2				18	
15-1424-03	Вагон-цистерна для технічної сірчаної кислоти	65	38,5±0,2					
15-1482-05	Вагон-цистерна для сірки	65,5	38,5±0,5	26,9±0,82			ТУ 24.05.419-79	24
15-1482-06		67,5						
15-1487-01	Вагон-цистерни для слабкої азотної кислоти	68,7	54,5±0,2	24,6±0,7			ТУ 24.00503-82	27
15-1487-02	Вагон-цистерна для КФК	67		25,3±0,7				
15-1525-01	Вагон-цистерна для жовтого фосфору	68,5	46,0±0,2				ТУ 24.00.518-84	30

Продовження таблиці 1

Шифр моделі	Найменування	Вантажо-підйомність, т, не більше	Об'єм, м ³	Масса тари, т	Габарит	ТУ	Срок служби, років
15-1534-03	Вагон-цистерна для пек	62	63,4±0,5	30,6±0,9	1-Т	ТУ 24.00.6222-90	24
15-1548-02	Вагон-цистерна для поліпшеної сірчаної кислоти	67	38,5±0,2	23,3±0,7	02-ВМ	ТУ 24.00.6205	27
15-1601-01	Вагон-цистерна для меланжу	65	46,0±0,2	23,9±0,7			13
15-1614-01	Вагон-цистерна для соляної кислоти	67	63,0±0,3	25,8±0,8			18
15-1519-02	Вагон-цистерна для зріджених вуглеводневих газів і легкої вуглеводневої сировини	49,0	75,7	35,1±1,0	1-Т	ТУ 24.05.515-81	40
15-1520-01	Вагон-цистерна для пентана	42,0	73,1	26,3±0,8	1-Т	ТУ 24.00.516-82	24
15-1556-03	Вагон-цистерна для хлору	57,5	46,0	30,5	02-ВМ	ТУ 24.00.803-82	
15-1597-01	Вагон-цистерна для аміаку	43,0	75,7	35,1	1-Т	ТУ 24-5.389-78	40
15-1780	Вагон-цистерна для пропану, бутану і їх сумішей	52,1	83,85	35,8±1,0		ТУ У 35.2-32258888-545-2004	

Відповідність загальних технічних параметрів вагонів-цистерн які виробляються в Україні. Порівнюючи вимоги ТСТ [17] до значень параметрів «максимальна конструкційна швидкість» і «навантаження на вісь», наведених в підпункті 4.3 з параметрами платформ чотирьох вісних цистерн відповідно до вимог інтероперабельності можна зробити висновок, що всі цистерни які випускаються в даний час на Україні за вказаними параметрами відповідають вимогам ТСТ [17].

Функції кінцевої зчіпки на цистернах КВБЗ виконує автозчепний пристрій типу СА-2. Конструкція зчіпного пристрою виключає необхідність присутності людини між з'єднаними або розщепленими вагонами під час їх руху, іншими словами - відповідає вимогам інтероперабельності. Місця встановлення домкратів на цистернах позначені, і за цим параметром цистерни відповідають вимогам ТСТ [17].

Відповідність міцності конструкції і цілісності вагона-цистерни (закріплення його деталей авторами не оцінювалася, однак можна прийняти, що зазначені параметри забезпечуються у зв'язку з тим, що вимоги до міцності конструкції є одними з основних вимог при розробці нормативно-конструкторської документації в Україні. Відповідності функціональних і технічних складових інтероперабельності з вузлами цистерн, що випускаються на Україні наведені в табл. 2 і 3.

Таблиця 2

Відповідність функціональних складових інтероперабельності до вузлів вагона-цистерни

Функціональна складова ТСТ	Відповідний вузол вагона-цистерни згідно з вітчизняною термінологією
Міцність конструкції.	Ходові частини, кузов.
Цілісність вагону	Ходові частини, кузов, ударно-тягові прилади, гальма
Габарит	Кузов, ходові частини
Сумісність з системами виявлення поїздів	Ходові частини

Продовження таблиці 2

Функціональна складова ТСІ	Відповідний вузол вагона-цистерни згідно з вітчизняною термінологією
Безпека проти сходу з рейок	Ходові частини
Вимоги безпеки до гальм	Гальма
Загальні функціональні вимоги до гальм	Гальма
Характеристики робочих гальм	Гальма
Характеристики стоянкових гальм	Гальма
Теплове розсіювання в гальмах	Гальма
Динамка вагона	Кузов, ходові частини
Параметри колісних пар	Ходові частини
Параметри осей	Ходові частини
Букси і підшипники	Ходові частини
Колісні пари змінної ширини колії	Відсутня
Елементи, що забезпечують індивідуальну заміну колісних пар	Відсутня

Таблиця 3

Таблиця відповідності технічних складових інтероперабельності з вузлами цистерн

Технічна складова ТСІ	Відповідний вузол вагона-цистерни згідно з вітчизняною термінологією
Кінцева зчіпка	Ходові частини
Внутрішнє з'єднання між частинами одного вагона	Відсутня
Системи контролю стану буксових підшипників	Ходові частини
Конструкція рами візка	Ходові частини
Протиюзний захист	Гальма
Вплив на навколишнє середовище	Відсутня
Пожежна безпека	Відсутня
Захист від ураження електричним струмом	Відсутня
Пристрої для установки хвостового сигналу	Кузов

Необхідно зазначити, що авторами не проводилася оцінка відповідності динамічних параметрів цистерни і безпеки проти сходу з рейок. Також встановлено, що вагони виробництва КВБЗ не відповідають вимогам інтероперабельності за параметрами пристроїв для установки хвостових сигналів і маркування вагона відповідно до EN 15877-1: 2012.

Аналіз виконання вимог інтероперабельності до вагона-цистерни. Аналіз принципу дії і конструкції гальмівних систем вантажних вагонів показав, що вони оснащені пневматичною гальмівною трубою з внутрішнім діаметром 32 мм, забезпечують різні режими гальмування з різним часом спрацювання і відпуску, кожен вагон має три режими гальмування, стиснене повітря не використовується для інших цілей, крім гальмування. На підставі вищевикладеного можна зробити висновок, що гальмівні системи вагонів виробництва Крюківського вагонобудівного заводу за своїми основними конструкційними параметрами і принципом дії відповідають вимогам інтероперабельності.

Щодо відповідності габариту вагонів-цистерн, то визначення габариту рухомого складу залізниці (або габариту рухомого складу) приведено в ДСТУ Б В.2.3-29: 2011 [19], а також у пам'ятці ОСЖД О 500 «Общие правила по габаритам для подвижного состава в интероперабельном международном сообщении». Вагони-цистерни, які досліджуються, побудовані за габаритом 01-ВМ і не відповідають вимогам інтероперабельності для колії 1435 мм, але відповідають зазначеним вимогам для колії 1520 мм, а цистерни, побудовані по габариту 02-ВМ відповідають вимогам інтероперабельності.

Був виконаний аналіз виконання умов, при виконанні яких можливий схід рухомого складу. Для цього авторами був проведений розрахунок на виконання умов сходу рухомого складу. Розрахунок проводився для порожнього вагона при наявності підвищення зовнішньої рейки $h_p = 0,15$ м і $h_p=0$. Відповідно до проведених розрахунків, умова стійкості від сходу з

рейок для вагона-цистерни моделі 11-286 в обох випадках стійкість вагона забезпечена. Однак отримані значення не є достатньо точними. Розрахунки за нормами [20, 21] не дають можливості враховувати параметри рейкової колії, а саме нерівності як у вертикальній, так і в горизонтальній площині, які зустрічаються в процесі експлуатації. Також розрахунки критеріїв безпеки руху за даними нормами не дозволяють встановити вплив зносу колісних пар і залізничної колії. Крім цього, перевищення допустимого значення коефіцієнта запасу стійкості колісної пари від сходу не завжди призводить до вкочуванні гребня колеса на головку рейки. Це пояснюється тим, що співвідношення вертикального навантаження до горизонтальної сили може перевищити допустиме значення, але при цьому зазор між гребнем і рейкою ще не буде вичерпаний.

Висновки

Для інтеграції України в єдиний європейський простір перед виробниками залізничної продукції постають нові виклики, з яких визначальним є приведення продукції, що випускається, до вимог європейського законодавства. Крюківський вагонобудівний завод, являючись провідним вітчизняним виробником рухомого складу, в умовах відкритої конкуренції з європейськими виробниками може програти конкурентну боротьбу, якщо не буде вживати заходів щодо приведення своєї продукції в відповідність до вимог інтероперабельності.

У преамбулі до Директиви [16] зазначено, що з метою дотримання відповідних положень про процедури закупівлі в залізничному секторі, підрядні організації повинні включати технічні специфікації в загальні документи або умови для кожного контракту. Для цього необхідно розробити звід правил, які будуть слугувати довідковими матеріалами для цих технічних специфікацій.

На сьогоднішній день на Україні випускається понад 15 моделей цистерн, для багатьох з яких задекларована можливість експлуатації на залізницях ЄС.

Аналіз нормативних документів ЄС в області інтероперабельності показав, що визначальним документом в даний час є Директива 2016/797 [16], яка до 2020 року діє паралельно з Директивою 2008/57 / ЄС [15].

Серед технічних специфікацій інтероперабельності безпосередньо пов'язаною до вагонів-цистерн є ТСТ «Рухомий склад-Вантажні вагони» [17], в якій наведено найголовніші вимоги до вантажних вагонів, в тому числі і до вагонів-цистерн. В зазначеному документі подаються посилання на норми EN і карти UIC, що визначають конкретні технічні та функціональні вимоги до окремих вузлів і конструкцій вагонів.

Аналіз вимог інтероперабельності для вантажних вагонів, в тому числі і до вагонів-цистерн показав, що вони стосуються наступних їх технічних і функціональних компонентів: кінцеві зчеплення; внутрішні з'єднання між частинами одного вагона; міцність конструкції; цілісність вагона; габарит; сумісність з допустимим навантаженням на колію; сумісність з системами виявлення поїздів; системи контролю стану буксових підшипників; безпеку проти сходу з рейок; динаміка вагона; конструкція рами візка; параметри колісних пар; параметри коліс; параметри осей; букси і підшипники; колісні пари змінної ширини колії; елементи, що забезпечують зміну відстані між колесами колісної пари; вимоги безпеки до гальм; загальні функціональні вимоги до гальм; характеристики робочих гальм; характеристики стоянкових гальм; теплове розсіювання в гальмах; протизнозного захисту; вплив на навколишнє середовище; пожежна безпека; захист від ураження електричним струмом; пристрої для установки хвостового сигналу. Оскільки не всі з зазначених компонентів існують в вагонах-цистернах, проведена декомпозиція вагона-цистерни на функціональні і технічні складові. Тоді для аналізу були обрані ті складові, які мають вирішальне значення в питанні відповідності конструкції вагона-цистерни вимогам інтероперабельності: навантаження на вісь, розмір, стійкість проти сходу з рейок.

Проведений аналіз вагонів-цистерн показав, що цистерна моделі 15-7076, не відповідає вимогам інтероперабельності за параметром «габарит рухомого складу». Вагони-цистерни моделей 15-776, 15-776-01 і 15-776Е мають габарит 02-ВМ, відповідний до гармонізованого габариту GC.

Принцип дії та конструкція гальмівних систем зазначених вагонів-цистерн (автоматичні гальма з декількома режимами гальмування, відключаються, використання безперервного повітропроводу діаметром 32 мм, кінцевих кранів тощо) відповідають основним вимогам інтероперабельності, проте, при застосуванні візків типу 18-100 та їх аналогів з одностороннім натисненням гальмівних колодок на вісь, не забезпечують регламентованої в ТСТ [17] величини гальмівно-

го шляху. Крім цього, вагони-цистерни 15-776, 15-776-01 і 15-776Е не відповідають ряду вимог інтероперабельності, приведення до відповідності з якими не становить великої технічної проблеми.

Для вагона-цистерни моделі 15-776 була виконана перевірка умови стійкості від сходу з рейок. Коефіцієнт стійкості від сходу для вагона даної моделі за другими розрахунковим методом склав 1,72, що не перевищило допустимого значення. Аналіз самої методики розрахунку показав, що розрахунки за затвердженими нормами не дають можливості враховувати несправності залізничної колії і знос ходових частин рухомого складу, які спостерігаються в експлуатації. Ці неточності можна врахувати за допомогою математичного моделювання.

Створення математичних моделей вагонів дозволить враховувати основні особливості конструкції ходових частин, знос колісних пар, залізничної колії і встановлювати момент часу, коли вичерпується зазор між гребнем колеса і рейкою (виникає їх динамічна взаємодія). Також для таких завдань необхідно володіти аналізом європейського досвіду у визначенні критеріїв безпеки руху.

В результаті проведеної роботи стало зрозумілим те, що для приведення вагонів-цистерн які виробляються в Україні у повну відповідність з умовами інтероперабельності необхідно:

1. Вирішити всі технічні питання, пов'язані з заміною візків типу 18-100 на візки Y25 або інші типи, які відповідають вимогам інтероперабельності.

2. Провести сертифікаційні випробування вагонів-цистерн з новими візками згідно вимог Директиви [17], ТСІ [17], EN 15273-3 [22] в процесі яких підтвердити відповідність їх розмірів габариту GC.

3. Внести необхідні зміни в гальмівну систему вагонів для забезпечення необхідного значення гальмівного шляху, провести відповідні сертифікаційні випробування згідно з вимогами Директиви [16], ТСІ [17] і документів, на які є в них посилання.

4. Внести необхідні незначні зміни в конструкцію для забезпечення виконання вимог до кріплення хвостового сигналу у вагонах, розміщення приводу ручного гальма з двох сторін вагона, маркування тощо.

5. Провести повний комплекс сертифікаційних випробувань (включаючи динамічні) згідно з вимогами Директиви [16] і отримати відповідні сертифікаційні документи.

Таким чином, в представленій роботі проаналізована конструкція і основні функціональні характеристики вагонів-цистерн, що випускаються в даний час на відповідність вимогам інтероперабельності та запропоновані першочергові заходи щодо досягнення вказаної відповідності.

Перелік використаних джерел:

1. Губенко В.К. Цистерны (Устройство, эксплуатация, ремонт): Справочное пособие / В.К. Губенко, А.П. Никодимов, Г.К. Жилин. – М. : Транспорт, 1990. – 151 с.
2. Вітчизняні підприємства у 2021 році скоротили виробництво вагонів на понад 30% [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://graintrade.com.ua/novosti/vitchiznyani-pidpriemstva-u-2021-rotci-skorotili-virobnitctvo-vagoniv-na-ponad-30.html>.
3. Офіційний сайт ННІ «Дніпропетровський інститут інфраструктури і транспорту» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://diit.edu.ua/faculty/all>.
4. Офіційний сайт КВБЗ [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.kvsz.com>.
5. Офіційний сайт Азовмаш [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://azovmash.com/ua/catalog/25>.
6. Офіційний сайт «Полтававагон» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.poltavvagon.com/ua/products/ximiya-preparat>.
7. Терещак Ю.В. Вимоги з допуску рухомого складу до експлуатації у міжнародному сполученні / Ю.В. Терещак // Залізничний транспорт України. – 2011. – № 6. – С. 39-41.
8. Донченко А.В. Разработка конструкций и расчетные исследования четырехосной цистерны с повышенной осевой нагрузкой : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Донченко Анатолий Владимирович. – Днепропетровск, 1990. – 21 с.
9. Олещак В.С. Статическая и динамическая нагруженность четырехосной безрамной цистерны с внутренним обустройством : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Олещак Валерий Станиславович. – Днепропетровск, 1992. – 23 с.
10. Лавренко Д.Т. Покращення технічних характеристик вагонів-цистерн шляхом удоскона-

- лення їх конструкції : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Лавренко Дмитро Трохимович. – Днепропетровск, 2003. – 25 с.
11. Милянч А.Р. Определение оптимального заполнения железнодорожных цистерн по критерию напряжения в логистических цепях перевозок / А. Р. Милянч // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. – 2014. – Вип. 1(28). – С. 96-97.
 12. Odanovic Z. Analysis of the railway freight car axle fracture / Z. Odanovic // Procedia Structural Integrity. – 2017. – № 4. – Pp. 56-63. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.07.009>.
 13. Vasiliev A.S. Efficiency Evaluation of FreightCars Perspective Draft Gear Coupler / A.S. Vasiliev // Procedia Engineering. – 2017. – № 206. – Pp. 299-304. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.477>.
 14. Structural Improvements in a Tank Wagon with Modern Software Packages / G. Vatulja, A. Falendysh, Y. Orel, M. Pavliuchenkov / 10th International Scientific Conference Transbaltica 2017: Transportation, Science and Technology. Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 187. – Pp. 301-307. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.379>.
 15. Directive 2008/57/EC of the European Parliament and of the Council of 17 June 2008 on the interoperability of the rail system within the Community [Electronic resource]. – Mode of access: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32008L0057>.
 16. Directive (EU) 2016/797 of the European Parliament and of the Council of 11 May 2016 on the interoperability of the rail system within the European Union [Electronic resource]. – Mode of access: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016L0797&from=EN>.
 17. Commission regulation (EU) No 321/2013 of 13 March 2013 concerning the technical specification for interoperability relating to the subsystem «rolling stock – freight wagons» of the rail system in the European Union and repealing Decision 2006/861/EC [Electronic resource]. – Mode of access: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1536757458116&uri=CELEX%3A32013R0321>.
 18. Правила технічної експлуатації залізниць України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0050-97>.
 19. ДСТУ Б В.2.3. Габарити наближення будівель і рухомого складу залізниць колії 1520 (1524) мм (ГОСТ 9238, MOD). – Введ. 2012-12-01. – Київ, 2011. – 50 с.
 20. Тяговые расчеты: Справочник / П.Т. Гребенюк, А.Н. Долганов, А.И. Скворцова; под. ред. П.Т. Гребенюка. – М. : Транспорт, 1987. – 272 с.
 21. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – М. : Транспорт, 1985. – 287 с.
 22. EN 15273-3: 2013 15273-3: 2013 Railway applications - Gauges - Part 3: Structure gauges [Electronic resource]. – Mode of access: <https://ru.scribd.com/document/350958557/EN-15237-3-2013>.

References:

1. Gubenko V.K., Nikodimov A.P., Zhilin G.K. *Tsisterny (Ustroistvo, ekspluatatsiia, remont): Spravochnoe posobie* [Tanks (Device, operation, repair): Reference guide]. Moscow, Transport Publ., 1990. 151 p. (Rus.)
2. *Vitchizniani pidpriemstva u 2021 rotsi skorotili virobnitstvo vagoniv na ponad 30%* (In 2021, domestic enterprises reduced the production of wagons by more than 30%) Available at: <https://graintrade.com.ua/novosti/vitchiznyani-pidpriemstva-u-2021-rotci-skorotili-virobnitctvo-vagoniv-na-ponad-30.html> (accessed 15 December 2021) (Ukr.)
3. *Ofitsiinii sait NNI «Dnipropetrovs'kii institut infrastrukturi i transportu»* (Official website of the Dnipropetrovsk Institute of Infrastructure and Transport) Available at: <https://diit.edu.ua/faculty/all> (accessed 10 December 2021) (Ukr.)
4. *Ofitsiinii sait KVBZ* (The official site of the KBZ) Available at: <http://www.kvsz.com> (accessed 20 January 2022) (Ukr.)
5. *Ofitsiinii sait Azovmash* (Official website of Azovmash) Available at: <https://azovmash.com/ua/catalog/25> (accessed 10 November 2021) (Ukr.)
6. *Ofitsiinii sait «Poltavavagon»* (Official site «Poltavawagon») Available at: <https://www.poltavvagon.com.ua/products/ximiya-preparat> (accessed 10 November 2021) (Ukr.)
7. Tereshchak Iu.V. *Vimogi z dopusku rukhomogo skladu do ekspluatatsii u mizhnarodnomu*

- spoluchenni [Requirements for admission of rolling stock to operation in international traffic]. *Zalozhnykh transport Ukraini – Railway transport of Ukraine*, 2011, № 6, pp. 39-41. (Ukr.)
8. Donchenko A.V. *Razrabotka konstruktivnykh i raschetnykh issledovaniia chetyrekhosnoi tsisterny s povyshennoi osevoi nagruzkoj*. Avtoref. diss. kand. techn. nauk [Development of structures and computational studies of a four-axle tank with increased axial load. Thesis of Cand. tech. sci. diss.]. Dnepropetrovsk, 1990. 21 p. (Rus.)
 9. Oleshchak V.S. *Sticheskaia i dinamicheskaia nagruzhenost' chetyrekhosnoi bezramnoi tsisterny s vnutrennim obustroistvom*. Avtoref. diss. kand. techn. nauk [Static and dynamic loading of a four-axle frameless tank with internal equipment. Thesis of Cand. tech. sci. diss.]. Dnepropetrovsk, 1992. 23 p. (Rus.)
 10. Lavrenko D.T. *Pokrashchennia tekhnichnikh kharakteristik vagoniv-tsistern shliakhom udoskonalennia ikh konstruktivnykh*. Avtoref. diss. kand. techn. nauk [Improvement of technical characteristics of tank cars by improvement of their construction. Thesis of Cand. tech. sci. diss.]. Dnipropetrovsk, 2003. 25 p. (Ukr.)
 11. Milyanich A.R. *Opredelenie optimal'nogo zapolneniia zheleznodorozhnykh tsistern po kriteriiu napriazheniia v logisticheskikh tsepiakh perevozok* [Determination of the optimal filling of railway tanks according to the criterion of stress in the logistics chains of transportation]. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta: Nauka i transport – Bulletin of the Belarusian State University of Transport: Science and Transport*, 2014, vol. 1(28), pp. 96-97. (Rus.)
 12. Odanovic Z. Analysis of the railway freight car axle fracture. *Procedia Structural Integrity*, 2017, № 4, pp. 56-63. doi: 10.1016/j.prostr.2017.07.009.
 13. Vasiliev A.S. Efficiency Evaluation of Freight Cars Perspective Draft Gear Coupler. *Procedia Engineering*, 2017, № 206, pp. 299-304. doi: 10.1016/j.proeng.2017.10.477.
 14. Vatulia G., Falendysh A., Orel Y., Pavliuchenkov M. Structural Improvements in a Tank Wagon with Modern Software Packages. *10th International Scientific Conference Transbaltica 2017: Transportation, Science and Technology. Procedia Engineering*, 2017, vol. 187, pp. 301-307. doi: 10.1016/j.proeng.2017.04.379.
 15. Directive 2008/57/EC of the European Parliament and of the Council of 17 June 2008 on the interoperability of the rail system within the Community Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32008L0057> (accessed 02 February 2022).
 16. Directive (EU) 2016/797 of the European Parliament and of the Council of 11 May 2016 on the interoperability of the rail system within the European Union Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016L0797&from=EN> (accessed 02 February 2022).
 17. Commission regulation (EU) No 321/2013 of 13 March 2013 concerning the technical specification for interoperability relating to the subsystem «rolling stock – freight wagons» of the rail system in the European Union and repealing Decision 2006/861/EC Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1536757458116&uri=CELEX%3A32013R0321> (accessed 15 January 2022).
 18. *Pravila tekhnichnoi ekspluatatsii zalozhnykh Ukraini* (Rules for the technical operation of Ukrainian railways) Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0050-97> (accessed 3 January 2022). (Ukr.)
 19. *DSTU B V.2.3. Gabariti nablizhennia budivel' i rukhomogo skladu zalozhnykh kolii 1520 (1524) mm* [State Standard B V.2.3. Approximate dimensions of buildings and rolling stock of railway tracks 1520 (1524) mm]. Kyiv, 2011. 50 p. (Ukr.)
 20. Grebeniuk P.T., Dolganov A.N., Skvortsova A.I. *Tiagovye raschety: Spravochnik* [Traction Calculations: Handbook]. Moscow, Transport Publ., 1987. 272 p. (Rus.)
 21. *Pravila tiagovykh raschetov dlia poezdnoi raboty* [Rules for traction calculations for train operation]. Moscow, Transport Publ., 1985. 287 p. (Rus.)
 22. EN 15273-3: 2013 Railway applications - Gauges - Part 3: Structure gauges Available at: <https://ru.scribd.com/document/350958557/EN-15237-3-2013> (accessed 03 February 2022).

Рецензент: А.П. Фалендиш
д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 20.02.2022

ДО УВАГИ АВТОРІВ!

До публікації у збірнику приймаються тільки наукові статті, виконані відповідно до вимог Постанови Президії ВАК України від 15.01.2003р. № 7-05/1, які мають наступні необхідні елементи: **постановка проблеми** у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями; **аналіз останніх досліджень і публікацій**, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спирається автор, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття; **формулювання цілей статті** (постановка завдання); **виклад основного матеріалу** дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів; **висновки** з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямку та **перелік використаних джерел** (оформлений відповідно до стандартів – ГОСТ 7.1-84, ДСТУ 3582-97, ГОСТ 7.12-93). Список джерел повинен бути складений в порядку спогаду в тексті. Посилання на літературу поміщають у квадратні дужки. Після списку використаних джерел надається пристатейна бібліографія латиницею (**References**).

Стаття може бути представлена на українській або англійській мовах в макетному варіанті. Текст статті, **завізований авторами власноручним підписом**, подається в редакцію збірника в друкарському вигляді (**1 примірник**), з **вказаними робочими телефонами та електронними адресами авторів**.

Стаття приймається до розгляду тільки при наявності відповідних супровідних документів та електронного варіанту на електронному носії у вигляді текстового файлу у форматі редактора Microsoft Office Word.

Формат листа – А4. Розміри полів: верхнє, нижнє – по 20 мм; ліве, праве – по 25 мм Основний текст набирається шрифтом Times New Roman, розмір 11, міжрядковий інтервал – 1,0. Червоний рядок абзаців відповідає відступу – 1 см. Нумерація сторінок не проставляється. Вирівнювання тексту виконується по ширині. Для спеціальних символів і формул використовувати шрифт Symbol MT Extra, в редакторі формул слід використовувати математичний курсив. Графічний матеріал, представлений у вигляді малюнків і графіків, повинен бути вмонтований в текст статті.

Стаття повинна містити номер УДК (в лівому верхньому кутку). На наступному рядку по правому полю, жирним шрифтом, розмір 11 – прізвище, ім'я та по батькові (у називному відмінку) з нарядковими номерами; в нижній частині першої сторінки у вигляді зноски курсивом, розмір шрифту 10 – науковий ступінь, вчене звання (як що немає – посада), місце роботи (без скорочень), місто, ORCID при наявності, адреса електронної пошти; іноземні автори вказують назву країни. Далі, після міжрядкового інтервалу друкується назва статті (прописними літерами, по центру, без заключної крапки); анотації двома мовами (для статей не англійською мовою обсяг анотації англійською мовою – не менш як 1800 знаків, включаючи ключові слова; для статей не українською мовою обсяг анотації українською мовою – не менш як 1800 знаків, включаючи ключові слова), першою наводиться анотація на мові статті (відступ зліва і справа по 1 см, курсивом) та ключові слова (від трьох до восьми).

Наприкінці статті повинні бути приведені ініціали, прізвище, вчений ступінь, вчене звання, місце роботи рецензента; дата подачі статті.

До статті надаються наступні супровідні матеріали (**по одному примірнику**):

- експертний висновок про можливість публікації статті у відкритому друці;
- рецензія фахівця за профілем статті, в якій повинні бути відображені наукова новизна результатів, їх цінність і значущість, зауваження по суті статті і по її оформленню;
- згода на обробку персональних даних (окрема для кожного з співавторів);
- ліцензійний договір (**у двох екземплярах**).

Форми необхідних документів та вимоги до оформлення статей представлені на сайті (http://journals.uran.ua/vestnikpgtu_tech/pages/view/requirements). Архів видань див.: <http://eir.pstu.edu/handle/123456789/1>, http://journals.uran.ua/vestnikpgtu_tech/issue/archive.

Відповідальність за зміст статті несе автор. Статті, що не відповідають зазначеним вимогам, не розглядаються.

Повністю оформлені статті і необхідні документи передаються в редакцію збірника відповідальному секретарю Савенко Ользі Сергіївні, тел.: (098) 480-24-03.

Підписано до друку 25.05.2022 р.

Папір тип № 2. Умов. друк. ар. 11,74. Тираж 400.

Матеріали збірника друкуються мовою оригіналу. Ціна договірної