

**ОСОБЛИВОСТІ ОЦІНЮВАННЯ І ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ
СУДНОВИХ ТЕПЛООБМІННИХ АПАРАТІВ В СИСТЕМІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ
НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ**

Грицук І.В.	<i>д-р техн. наук, професор, Національний університет «Чернігівська політехніка», м. Чернігів, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7065-6820, e-mail: gritsuk_iv@ukr.net;</i>
Худяков І.В.	<i>канд. техн. наук, доцент, Херсонська державна морська академія, м. Херсон; Національний університет «Чернігівська політехніка», м. Чернігів, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8900-7879, e-mail: igor.khudiakov563@gmail.com;</i>
Погорлецький Д.С.	<i>канд. техн. наук, доцент, Херсонська державна морська академія, м. Херсон; Національний університет «Чернігівська політехніка», м. Чернігів, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1256-8053, e-mail: dimon150582@gmail.com;</i>
Черненко В.В.	<i>ст. викладач, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2013-7058, e-mail: v.chernenko18@gmail.com;</i>
Котов А.І.	<i>ст. викладач, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7648-023X, e-mail: kotovai055@gmail.com;</i>
Задорожній В.К.	<i>магістрант, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: https://orcid.org/0009-0001-0118-1654, e-mail: zadorozhnii.volodymyr.mmm@gmail.com</i>

Одним із напрямів удосконалення суднових енергетичних установок є підвищення їхньої ефективності під час перетворення теплової енергії в окремих елементах системи. Такі процеси базуються на законах термодинаміки, гідрогазодинаміки та тепломасообміну, і саме вони визначають коефіцієнт корисної дії установки, обсяг теплових та шкідливих викидів, строк служби, а також компактність і досконалість систем. Важливу роль у формуванні цих показників відіграють теплообмінники, які є ключовими складовими енергетичних установок. Обґрунтована необхідність удосконалення обладнання суднових енергетичних установок і теплообмінних апаратів, що визначають практичний запит на розробку, удосконалення і впровадження науково-технічних розробок і рішень для інтенсифікації процесів теплообміну в умовах експлуатації судна. Обґрунтовані і системно ураховані особливості оцінювання і прогнозування стану суднових теплообмінних апаратів у системі експлуатації на основі технології цифрових двійників вантажного судна і суднової енергетичної установки. Розроблена модель і інформаційна складна система в реалізації задач дослідження, що дозволяє надалі досліджувати укрупненою моделлю представлення цифрового двійника інтелектуальної системи управління експлуатацією вантажного судна та суднової енергетичної установки. Теоретично та експериментально обґрунтовані реалізації досліджуваного застосування в частині практичних методів формування цифрового двійника для представлення результатів роботи теплообмінного обладнання судна в реальних умовах експлуатації. Наведений приклад застосування методу для реального теплообмінника судна.

Ключові слова: інформаційна модель, цифровий двійник, теплообмінний апарат, система охолодження, суднова енергетична установка, модель, складна система.

Постановка проблеми

Одним із шляхів вдосконалення суднових та транспортних енергетичних установок є підвищення ефективності у процесах перетворення теплової енергії в їхніх елементах [1]. Ці процеси підпорядковуються законам термодинаміки, гідрогазодинаміки та тепломасообміну і визначають ефективний коефіцієнт корисної дії установок, рівень теплових викидів та шкідливих викидів у відпрацьованих газах, ресурс та компактність й досконалість систем [2, 3]. Значний вплив на зазначені показники мають теплообмінні апарати, які є невід’ємними елементами енергетичних установок [4-6].

Відомо, що техніко-економічні показники теплових енергетичних установок в значному визначаються параметрами теплового обладнання і теплообмінників. Необхідність удосконалення обладнання суднових

енергетичних установок та зростання масових і габаритних показників теплових і теплообмінних апаратів визначають практичний запит на розробку, удосконалення і впровадження науково-технічних розробок і рішень для інтенсифікації процесів конвективного теплообміну [7-9]. Це спрямовано на комплексне покращення економічних, екологічних, ресурсних і масогабаритних характеристик обладнання, а також на зменшення витрати палива і теплових та шкідливих викидів. Аналіз сучасного стану проблем підвищення ефективності перетворення енергетичних ресурсів та зниження теплових й шкідливих викидів відпрацьованих газів двигунів у судновій енергетиці підтверджує актуальність вдосконалення енергетичних установок шляхом інтенсифікації роботи та процесів конвективного теплообміну в їхніх теплообмінних апаратах. Це дозволяє створювати обладнання з покращеними

економічними, екологічними, ресурсними та масогабаритними показниками [10-12].

Крім цього, вирішення завдання управління процесами технічного обслуговування (ТО) та ремонту вантажних суден відповідно до міжнародних стандартів якості та їх інтеграції в систему управління безпекою вимагає науково обґрунтованого встановлення взаємозв'язку між результатами функціонування системи й конфігурацією системи ТО [13-17]. Сучасні міжнародні нормативні документи та стандарти, що були розроблені протягом останніх двох десятиліть, пропонують інший підхід – формування зворотного зв'язку між технічним об'єктом системного впливу при ТО та особливостями конфігурації системи ТО на основі аналізу експлуатаційних відмов і особливостей експлуатації. Зважаючи на особливості судових систем ТО, відмова є відносно рідкісним явищем, що обмежує інформаційну базу для прийняття рішень, тому постає необхідність пошуку шляхів використання особливостей експлуатації та результатів ТО як інформаційного ресурсу.

У цьому контексті формальна оцінка безпеки, рекомендована ІМО, повинна стати ключовим елементом технології управління ТО. Це забезпечує можливість інтеграції управлінських рішень у систему управління безпекою судна та компанії, а також визначає їх вплив на конкурентоспроможність у морських перевезеннях [18-20].

Актуальність завдання вдосконалення управління експлуатацією і ТО морських суден посилюється й розвитком цифрових технологій. Це дозволяє перейти від традиційного планового прийняття рішень до рішень, заснованих на прогнозуванні і на ймовірнісному аналізі наслідків. Вони базуються на використанні науково обґрунтованих алгоритмів з використанням інтелектуальних виробничих процесів і технологій цифрових двійників [21-23]. Наведений підхід мінімізує вплив людського фактора на якість управління і прийняття рішень в частині технічної експлуатації суден і судових технічних систем, а також в частині їх технічних обслуговувань.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Поява інтелектуальних виробничих парадигм, таких як німецька «Індустрія 4.0» та китайська «Зроблено в Китаї 2025» [24], потребує комплексної модернізації традиційного виробництва з метою підвищення ефективності та продуктивності. Ця трансформація є ключовою для швидкої інтеграції цифрових та інтелектуальних технологій у виробничі процеси. Методологія цифрових двійників отримала широке визнання у різних галузях промисловості, оскільки дозволяє створювати віртуальні уявлення фізичних об'єктів та забезпечувати доступ до даних у реальному часі, що сприяє зниженню витрат та підвищенню операційної ефективності [25]. Як прогресивний аспект промислової еволюції, дана методологія стимулює розвиток

виробництва через впровадження сучасних інформаційних технологій, включаючи робототехніку, промисловий інтернет, штучний інтелект і аналітику великих даних [26]. Інтеграція цифрових інструментів та аналізу даних значно оптимізує виробничі процеси, забезпечуючи помітне підвищення ефективності. Головна мета інтелектуального виробництва полягає у створенні гнучкої та чутливої системи, здатної швидко адаптуватися до змін ринку, задовольняти індивідуальні вимоги клієнтів та надавати високоякісні продукти та послуги у разі зниження витрат [27].

Ідея цифрового двійника вперше з'явилася у міжнародних дослідженнях приблизно два десятиліття тому, що підтверджує її приналежність до порівняно нових наукових напрямів. Цей підхід поєднує сучасні нелінійні багатомасштабні та мультифізичні моделі в єдину систему, що дозволяє відтворювати реальні реакції фізичних об'єктів на зміни довкілля. Перші згадки про концепцію стосуються 2002 року, коли Майкл Гривз запропонував розглядати цифрове інформаційне відображення фізичної системи як самостійну сутність. Спочатку технологія використовувалася в галузі управління життєвим циклом продукту (PLM) [28, 29], проте згодом її застосування значно розширилося, охопивши практики ощадливого виробництва, а також взаємодія виробників та споживачів на всіх стадіях життєвого циклу виробу – від проектування та виготовлення до обслуговування та утилізації [30].

У 2011 році Дослідницька лабораторія ВПС США разом із NASA запропонувала використати концепцію цифрового двійника при проектуванні перспективних авіаційних систем. З 2015 року розвиток цієї технології прискорився, а сфера її використання значно розширилася. Найбільші промислові компанії світу, включаючи Siemens та General Electric (GE), інвестували значні ресурси у напрям цифрових двійників, що забезпечило їх активне впровадження та інтеграцію в різні галузі промисловості [31].

Цифровий двійник є технологічною системою, що поєднує в собі багатофізичні, багатомасштабні та міждисциплінарні характеристики. Його ключові особливості полягають у здатності до синхронізації з фізичним об'єктом у режимі реального часу, високої точності відображення та деталізованих параметрах, що дозволяє забезпечити тісну взаємодію та інтеграцію цифрового та матеріального середовища [32]. Використання цифрових двійників забезпечує наскрізне поєднання віртуального та реального світів завдяки застосуванню методів моделювання, аналізу та консолідації даних, можливості яких розширюються за рахунок штучного інтелекту та технологій обробки великих даних [33]. Ця технологія не лише спрощує поєднання виробничої інформації з фізичними процесами, а й відкриває широкі перспективи у розвиток інтелектуального виробництва. Практичні застосування цифрових двійників охоплюють такі галузі, як промисловість [34], охорона здоров'я [35], енергетика [36], «розумні» міста [37] та аерокосмічна галузь [38], сприяючи

зростанню ефективності, підвищенню продуктивності та стимулюванню інновацій.

Технологія цифрових двійників займає ключове місце у розвитку інтелектуального виробництва, оскільки дозволяє формувати деталізовані віртуальні моделі виробництв і систем технічного обслуговування засобів морського транспорту [18]. Застосування таких моделей сприяє моделюванню та оптимізації виробничих процесів, виявленню потенційних ризиків та відкриттю додаткових можливостей для їх удосконалення [19]. Завдяки цьому підприємства отримують можливість приймати більш зважені рішення у сфері планування виробництва та розподілу ресурсів, що підтверджується успішними практичними прикладами у різних секторах промисловості [20]. Впровадження сенсорних технологій, промислового інтернету, методів машинного навчання та інструментів аналізу даних у цифрові двійники формує замкнутий контур керування [22].

Для розрахунку теплообмінників і теплообмінного обладнання на ринках програмного забезпечення використовується багато різноманітних програм різних виробників. Серед них є програма AspenExchanger Design & Rating (EDR) [39] – це спеціалізований пакет програмного забезпечення від AspenTech для теплового та механічного проектування, моделювання та оцінки теплообмінників, що дозволяє знаходити оптимальні, економічно ефективні конфігурації, виконувати детальний аналіз та інтегруватися з симуляторами процесів. Серед них Aspen HYSYS та Aspen Plus. Програмне забезпечення допомагає оптимізувати конструкції теплообмінників, прогнозувати забруднення та забезпечувати відповідність галузевим стандартам, оптимізуючи як капітальні (CAPEX), так і експлуатаційні (OPEX) витрати [39]. Заслужує уваги і програма COMSOL. Вона дозволяє визначати багатовимірні температурні поля в різних елементах конструкцій, проводити розрахунки середовищ в теплообмінниках. Крім цього, вона не може бути використана для автоматичного перебирання великої кількості варіантів компонування конструкцій та режимних параметрів. Це, в першу чергу, потрібно в задачах оптимізації. Існує ряд програм, створених саме виробниками теплообмінного обладнання, які дозволяють розраховувати (в тому числі і оптимізувати) наданий ним сортамент обладнання. Наприклад, це програма фірми Alfa Laval, AlfaSelect© Designer, CAS 200, SHC тощо. Нажаль, глибина досліджуваних полів в цих програмах не дуже значна. Тому для реалізації поставленої задачі в частині засобів розрахунку і оптимізації пластинчастого теплообмінного обладнання враховувались тільки сильні сторони відомого програмного забезпечення і формувались інформаційні можливості цифрового двійника на основі суднової енергетичної установки [40-43].

Системно аналіз теплообмінного суднового обладнання виконаний в роботах [1, 4]. Суднові теплотехнічні системи в якості робочих середовищ суднової

енергетичної установки (СЕУ), як правило, використовують забортну або прісну воду, повітря, паливо, масло. На сьогоднішній день перспективними теплоносіями також є органічні [3]. Системи охолодження головних двигунів призначені для забезпечення відводу теплової енергії від деталей механізмів, пристроїв, приладів, а також робочих середовищ суднових теплообмінних апаратів [1]. У суднових дизельних установках використовуються одноконтурні, двоконтурні і трьохконтурні системи охолодження. У двоконтурних системах використовується поєднання прісної і забортної води, в трьохконтурних – охолодження відбувається в три етапи – високотемпературний, середньотемпературний і контур забортної води. Насоси системи охолодження забортної води використовуються для аварійного осушення машинного відділення або подачі води різним споживачам на судні [2].

Найбільш доцільним, доступним і поширеним охолоджуючим матеріалом (середовищем) на судні є вода. Широке застосування води також обумовлено суттєвою технологічною перевагою, високим коефіцієнтом тепловіддачі і високою теплоємністю, навіть, при використанні відносно невисоких швидкостей переміщення охолоджуючого середовища, а саме 0,5 ... 2,5 м/с [1, 5]. Забортну воду можливо використовувати тільки для технологічних задач і завдань, коли нагрівання води не буде перевищувати 45°C [1, 6]. Це пояснюється тим, що солі, які входять (містяться) до складу забортної морської води починають осідати на теплообмінні поверхні суднового обладнання. Також, крім розчинних солей, в забортній морській воді також можуть міститися різноманітні домішки, включення і мікроорганізми, які негативно впливають на технічну експлуатацію систем охолодження, а особливо – теплообмінного обладнання суднової енергетичної установки. Також прийнято забортну воду на судні використовувати для охолодження маслоохолоджувачів суднових систем мащення редукторів та підшипників суднового валопроводу тощо [2].

Мета статті

Метою даного дослідження є обґрунтування і системне урахування особливостей оцінювання і прогнозування стану суднових теплообмінних апаратів у системі експлуатації на основі технології цифрових двійників вантажного судна і суднової енергетичної установки.

Для досягнення цієї мети було визначено такі дослідницькі завдання: розробка моделі і інформаційної складної системи в реалізації відповідних задач дослідження, що дозволяє надалі досліджувати укрупненою моделлю представлення цифрового двійника інтелектуальної системи управління експлуатацією вантажного судна та суднової енергетичної установки; теоретичне та експериментальне обґрунтування реалізації досліджуваного застосування в частині практичних методів формування цифрового двійника для

представлення результатів роботи теплообмінного обладнання судна в реальних умовах експлуатації.

Виклад основного матеріалу

Для формування інформаційного підходу в частині оцінювання і прогнозування технічного стану судна, суднової енергетичної установки, механізмів, систем, обладнання в системі його експлуатації було використано системний підхід і метод формування системи експлуатації складної технічної системи – судна за технологією цифрових двійників. Попри великий потенціал, впровадження технології і механізмів цифрових двійників має низку проблем. Найскладнішими є об'єднання різних технологій, дотримання стандартів та забезпечення постійного збору даних. Для інтеграції моделювання, імітації, передачі даних і штучного інтелекту потрібен високий рівень цифровізації судна і суднової енергетичної установки. Важливу роль відіграє і кваліфікація персоналу: успіх часто залежить від професійного рівня і досвіду.

Також актуальними залишаються дослідження у сфері збору та обробки даних про фізичні об'єкти, їх об'єднання з цифровими моделями та розробка нових методів взаємодії реального і віртуального середовищ. Використання цифрових двійників у морській галузі вже має значний прогрес у тривимірному візуальному моніторингу виробничих і технологічних процесів. Їх застосування успішно розширюється не тільки в морській галузі, а й в автомобілебудуванні, авіаційній та машинобудівній галузях. Основним завданням є створення моделей, що точно відображають виробничі лінії, дозволяють збирати дані в реальному часі та забезпечують синхронізацію між фізичними та цифровими системами. Це дає можливість організувати ефективний інтелектуальний моніторинг.

Саме це питання авторами в статті розглядається

$$DL_{CSOSMP} = \sum_{i=1}^a SBS_i \cup \sum_{j=1}^b ESMDM_j \cup \sum_{k=1}^c AMS_k \cup \sum_{l=1}^d OSPP_l \cup \sum_{m=1}^f IDMS_m \cup \sum_{n=1}^h MICPI_n \cup \sum_{o=1}^r DSPI_o \cup \sum_{p=1}^s CCBS_p \cup \sum_{q=1}^t OCS_q \quad (1)$$

Формула є укрупненою моделлю представлення цифрового двійника інтелектуальної системи управління експлуатацією вантажного судна та судновою енергетичною установкою, де DL_{CSOSMP} означає цифрову систему управління експлуатацією вантажного судна та судновою енергетичною установкою [39, 43-46]. Ця модель служить комплексним цифровим представленням, що дозволяє системно здійснювати моніторинг, контролювати робочі процеси, експлуатацію, оптимізацію та прогнозування параметрів технологічних процесів вантажного судна і його енергетичної установки в режимі реального часу. Аббревіатури в формулі (1) мають наступні значення: SBS – модель блоку судна як засобу морського транспорту; ESMDM – модель блоку енергетичних систем, механізмів,

на основі системних рішень в практиці суднової енергетичної установки в реалізації застосування теплообмінних апаратів (для прикладу). Дослідження зосереджується на використанні цифрових двійників у інформаційній системі технічного обслуговування судна. Для цього через сенсори та системи збору даних забезпечується отримання інформації в реальному часі та одночасне відтворення поведінки об'єктів у цифрових моделях. Такий підхід дає змогу швидко візуалізувати процеси та проводити їх аналіз. Головна мета роботи – створення інформаційної моделі цифрового двійника для моніторингу, аналізу і прогнозування параметрів роботи і стану робочих процесів суднових теплообмінних апаратів. Окрема увага приділяється результатам можливих варіантів спеціалізованої системи для аналізу роботи суднових теплообмінних апаратів, яка може забезпечити нові рішення та стати основою для подальшого вдосконалення технічного обслуговування складових суднової енергетичної установки.

Спираючись на запропоновану професором Тао Ф. [39, 42, 43] структуру для формування моделі цифрового двійника для побудови інтелектуальної системи експлуатації вантажного судна та суднової енергетичної установки, у складі п'ятивимірної структури цифрових двійників, що включає безпосередньо фізичний об'єкт, віртуальну модель, дані двійника, систему обслуговування і зв'язок. Це дослідження присвячене роботі, вдосконаленню та керуванню питаннями експлуатації теплообмінних апаратів у центральній системі охолодження головного двигуна судна й спрямоване на створення точної моделі цифрового двійника для підвищення ефективності експлуатації вантажного судна та його енергетичної установки.

Модель цифрового двійника інтелектуальної системи управління експлуатацією вантажного судна та судновою енергетичною установкою описано наступним чином (1):

пристроїв та засобів; AMS – модель блоку допоміжних механізмів та систем; OSPP – модель блоку роботи судна та його енергетичної установки; IDMS – модель блоку інтелектуальної системи прийняття рішень з точки зору технічної експлуатації судна та його енергетичної установки; MICPI – модель блоку моніторингу, ідентифікації, збору та обробки інформації; DSPI – модель блоку бази даних, зберігання та обробки інформації; CCBS – модель центрального блоку керування судном та його енергетичною установкою та OCS – модель блоку умов експлуатації судна та його енергетичної установки. Змінні в формулах a, b, c, d, f, h, r, s та t відповідають значенням кожної запропонованої моделі блоку системи.

Основні процеси вирішення поставлених і схожих

задач базуються, як правило, на реалізації системної взаємодії трьох основних взаємопов'язаних складових наукового дослідження: процесної (предметної), інформаційної (і комунікаційної) та аналітичної. Для урахування всіх основних особливостей оцінювання і прогнозування стану судових теплообмінних апаратів, обладнання у системі експлуатації на основі технології цифрових двійників вантажного судна і судової енергетичної установки та функціонування процесної (предметної) складової й аналітичної складової реалізується інформаційна і комунікаційна (в одній підсистемі) складова. Вона передбачає забезпечення комплексу заходів ідентифікації судна, енергетичної установки, двигунів, теплообмінних апаратів тощо, засобів автоматики, засобів інфраструктури, реалізації робіт в частині технічного обслуговування обладнання і управління процесами їх проведення, контроль наявності і управління процесами забезпечення запчастин і витратних матеріалів, моніторинг технічного стану обладнання (в тому числі теплообмінних апаратів) і витрати палива судном, викидів, а також збирання і

зберігання отриманих результатів в умовах взаємодії з інформаційним середовищем.

Процес оцінювання і прогнозування параметрів працездатності та технічного стану обладнання й судових теплообмінних апаратів, як складових в системі експлуатації, на основі технології цифрових двійників, інформаційної системи і інтелектуальних транспортних складових компонентів і систем передбачають уточнення інформації про реальний технічний стан судна (судової енергетичної установки, механізмів систем тощо) у змінних умовах експлуатації при реалізації системної взаємодії складових (в тому числі зміна значущих параметрів технічного стану, зміни температур, тисків, витрати палива і технологічних рідин тощо), методи й засоби їх реалізації, про витрату палива судна тощо. Вище викладену задачу можливо виразити, як складну функцію на основі інформації про параметри технічного стану в реалізаціях відповідних задач наукових досліджень, що можуть бути показані у відповідності до основних елементів і складових у рівнянні (1):

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{SMIs p} \left(\overline{H}_{SMi}, t, \Delta t, \overline{X}_i(t - n\Delta t), \overline{X}_i(t), \dots, \overline{X}_i(t - \Delta t), DR_{Lti} \right) = S_{OSPP}; \\ S_{OSPP} = \Omega_i^{k_i} (e_{SM}, r_i)^j; \\ S_{OSPP} = F_{OSPP} (S_{OSPS}; S_{OSPL}; S_{OSPM}); \\ S_{OSPP} = F_{OSPP} \left((M_{i1i}, M_{i2i}, M_{i3i}, M_{i4i}, M_{i5i}, M_{i6i}, M_{i7i}); (T_{SMIs p}, P_{DUi}) \right); \\ M_{i1i} = F_{i1i} \left(\overline{X}_{SMI1spi}(t) \right); \\ M_{i2i} = F_{i2i} \left(\overline{X}_{SMI2spi}(t) \right); \\ M_{i3i} = F_{i3i} \left(\left(\overline{X}_{SMI13spi}(t) \right); \left(\overline{X}_{SMI23spi}(t) \right); \left(\overline{X}_{SMI33spi}(t) \right); \left(\overline{X}_{SMI34spi}(t) \right) \right); \\ M_{i4i} = F_{i4i} \left(\overline{X}_{SMI4spi}(t) \right); \\ M_{i5i} = F_{i5i} \left(\overline{X}_{SMI5spi}(t) \right); \\ M_{i6i} = F_{i6i} \left(\left(\overline{X}_{SMI16spi}(t) \right); \left(\overline{X}_{SMI26spi}(t) \right); \left(\overline{X}_{SMI36spi}(t) \right) \right); \\ M_{i7i} = F_{i7i} \left(\overline{X}_{SMI7spi}(t) \right); \\ T_{SMIs p} = F_{SMIs p} \left(\left(\overline{X}_{SMIs pti}(t) \right); DR_{Lti} \right); \\ P_{DUi} = F_{DUi} \left(\overline{X}_{DUiti}(t) \right); \\ P_{esmpi}(t) = F \left(F_{SMIs p}, DR_{Lti}, S_{OSPP}, P_{DUi} \right) \rightarrow \max; \\ E_{mcosmpi}(t) = F \left(F_{SMIs p}, S_{OSPP} \right) \rightarrow \max; \\ E_{ufpfcsi}(t) = F \left(F_{SMIs p}, DR_{Lti}, S_{OSPP}, P_{DUi} \right) \rightarrow \max. \end{array} \right.$$

де $F_{SMIs p}$ – інформація системи про параметри стану і експлуатації вантажного судна (судової енергетичної установки тощо) у змінних умовах

виробничої експлуатації при системній взаємодії складових (в тому числі зміна значущих параметрів технічного стану, зміни температур, тисків, витрат палив і

технологічних рідин тощо); $\overline{H}_{SM_i}$ – вектор органа (ів) керування судновою енергетичною установкою, судном, двигуном тощо в поточному t часі; t – параметр поточного часу; Δt – інтервал часу (крок) між вимірюваннями; n – кількість інтервалів часу (кроків) у минулому; $\overline{X}_i(t)$ при $i = 1, \dots, m$ – поточні параметри зміни робочих і технологічних процесів і характеристик технічного стану і експлуатації вантажного судна (суднової енергетичної установки тощо) в процесах моніторингу у змінних умовах експлуатаційної взаємодії у встановлені моменти часу. Ці параметри виміряні і входять до переліку ретроспективних факторів (зміна значущих параметрів технічного стану, зміни температур, тисків, витрати палива і технологічних рідин тощо) експлуатації вантажного судна, суднової енергетичної установки тощо. Це саме поточні значення і параметри моделі цифрового двійника інтелектуальної системи; i – фіксовані встановлені вимірювальні параметри і характеристики стану і експлуатації вантажного судна (суднової енергетичної установки тощо) у змінних умовах експлуатації; $DR_{L_{ti}}$ – несправності (код, статус, параметри несправності за результатами ідентифікації) вантажного судна, суднової енергетичної установки тощо у змінних умовах експлуатації на основі результатів їх визначення і ідентифікації; S_{OSPP} – багаторозмірний показник – система забезпечення функціонування моделі цифрового двійника інтелектуальної системи експлуатації вантажного судна та суднової енергетичної установки в залежності від поставлених задач. У розглянутому випадку система S_{OSPP} – це відображення властивостей складових елементів (задач, підоб'єктів) e_{SM} і їх r_i відношень для k_i варіантів в частині J в I , підоб'єктів отримання інформації і підоб'єктів забезпечення системи експлуатації вантажного судна та суднової енергетичної установки у властивих складових (за поставленими задачами); Ω – оператор зв'язку (відображення для системи); k_i – кількість засобів для отримання інформації про параметри технічного стану і експлуатації вантажного судна та суднової енергетичної установки; l – зв'язки між основними складовими елементами і засобами спостереження та самими об'єктами для забезпечення експлуатації вантажного судна та суднової енергетичної установки у властивих складових (за поставленими задачами); e_{SM} – множина задач (підоб'єктів) забезпечення експлуатації вантажного судна та суднової енергетичної установки у властивих складових (за поставленими задачами); r_i – множина відношень між складовими; j – завдання для функціонування, для оперативного контролю і для управління; F_{OSPP} – інформація про параметри основних процесів експлуатації вантажного судна та суднової енергетичної установки у властивих складових в умовах експлуатації за поставленими задачами. Це завершений продукт органічного

поєднання складових як об'єктивних, так і суб'єктивних факторів експлуатації вантажного судна та суднової енергетичної установки; S_{OSPS} – складова функції для забезпечення системи інформацією про параметри технічної експлуатації вантажного судна та суднової енергетичної установки що базується на основі серверних рішень виконання процесів моніторингу, ідентифікації, збирання і обробки інформації; S_{OSPL} – складова функції для забезпечення системи інформацією про процеси застосування за призначенням і експлуатації вантажного судна та суднової енергетичної установки що базується на основі локального джерела інформації виконання моніторингу (за поставленими задачами); S_{OSPM} – складова функціоналу забезпечення системи інформацією про експлуатацію вантажного судна та суднової енергетичної установки на основі мережевих баз даних виконання системного моніторингу; F_{i1i} – набір інформації про параметри нормування основних технічних, технологічних, часових параметрів експлуатації вантажного судна та суднової енергетичної установки тощо; F_{i2i} – набір інформації про параметри зміни масо-вагових параметрів експлуатації вантажного судна та суднової енергетичної установки тощо; F_{i3i} – набір інформації про параметри умов експлуатації вантажного судна та суднової енергетичної установки. Враховуються наступні складові у змінних умовах експлуатації у взаємодії з навколишнім середовищем і інфраструктурою: умови водного середовища, умови транспортні, умови природно-кліматичні і умови культури праці; F_{i4i} – набір інформації про параметри виробничої експлуатації вантажного судна та суднової енергетичної установки у властивих складових; F_{i5i} – набір інформації про параметри технічної експлуатації вантажного судна та суднової енергетичної установки у властивих складових; F_{i6i} – набір інформації про параметри стану вантажного судна та суднової енергетичної установки у властивих складових до, під час і після проведення технічних впливів; F_{i7i} – набір інформації про параметри особливостей технічного обслуговування вантажного судна та суднової енергетичної установки у властивих складових; F_{SM1spi} – набір інформації про окремі параметри технічного стану і параметри експлуатації вантажного судна та суднової енергетичної установки тощо; F_{DUi} – набір інформації про параметри режимів управління вантажним судном, судновою енергетичною установкою та їх складовими; $\overline{X}_{SM1spi}(t)$ при $i = 1, \dots, m$ – параметри нормування основних технічних, технологічних, часових параметрів (M_{i1i}) експлуатації вантажного судна та суднової енергетичної установки тощо; $\overline{X}_{SM2spi}(t)$ при $i = 1, \dots, m$ – параметри зміни масо-вагових параметрів (M_{i2i}) експлуатації вантажного судна та суднової

енергетичної установки тощо; $\bar{X}_{SMI13spi}(t)$, $\bar{X}_{SMI23spi}(t)$, $\bar{X}_{SMI33spi}(t)$, $\bar{X}_{SMI34spi}(t)$ при $i = 1, \dots, m$ – параметри умов експлуатації вантажного судна та суднової енергетичної установки з відповідними складовими (M_{i3i}): умови водного середовища, умови транспортні, умови природно-кліматичні і умови культури праці у взаємодії з інфраструктурним середовищем, що виміряні і входять до переліку ретроспективних факторів; $\bar{X}_{SMI4spi}(t)$ при $i = 1, \dots, m$ – параметри виробничої експлуатації (M_{i4i}) вантажного судна та суднової енергетичної установки у властивих складових; $\bar{X}_{SMI5spi}(t)$ при $i = 1, \dots, m$ – параметри технічної експлуатації (M_{i5i}) вантажного судна та суднової енергетичної установки у властивих складових; $\bar{X}_{SMI16spi}(t)$, $\bar{X}_{SMI26spi}(t)$, $\bar{X}_{SMI36spi}(t)$ – при $i = 1, \dots, m$ – параметри стану (M_{i6i}) вантажного судна та суднової енергетичної установки у властивих складових відповідно до, під час і після проведення технічних впливів; $\bar{X}_{SMI17spi}(t)$ при $i = 1, \dots, m$ – параметри особливостей технічного обслуговування (M_{i7i}) вантажного судна та суднової енергетичної установки у властивих складових; $\bar{X}_{SMIspi}(t)$ при $i = 1, \dots, m$ – окремі параметри (T_{SMIspi}) технічного стану і параметри експлуатації вантажного судна та суднової енергетичної установки тощо; $\bar{X}_{Dui}(t)$ – при $i = 1, \dots, m$ – параметри режимів (P_{Dui}) управління вантажним судном, судновою енергетичною установкою та їх складовими, в тому числі саме в частині технічної експлуатації і технічного обслуговування; P_{esmpi} – ефективність експлуатації судна і суднової енергетичної установки; $E_{mcosmpi}$ – ефективність проведеного технічного обслуговування судна і суднової енергетичної установки; E_{upfcsi} – ефективність використання палива, технологічних рідин, витратних матеріалів, запчастин тощо.

Для оцінювання і прогнозування параметрів працездатності і технічного стану суднових теплообмінних апаратів в системі експлуатації на основі технології цифрових двійників інформаційна система повинна бути адаптована в умовах експлуатації на сталу роботу з отримання поточних даних. Аналітична складова

системи за технологією цифрових двійників призначена для оцінки всіх граничних значень, формування раціональних і оптимальних характеристик та прогнозування значень параметрів технічного стану суднових теплообмінних апаратів в системі експлуатації та забезпечення взаємодії з іншими системами транспортного судна і суднової енергетичної установки. Також аналітична складова системи виконує дії для розрахунково-аналітичного формування відповідної складової виконання сталого контролю і, в цілому, для забезпечення технічного стану вантажного транспортного судна, його енергетичної установки та в окремих складових, компонентах, механізмах і системах при відтворенні процесів забезпечення всіх складових ефективностей експлуатації, проведення технічних обслуговувань та в частині використання палива, технологічних рідин, витратних матеріалів, запчастин тощо [11, 13, 43].

Цільовою функцією дослідження ($Q_{\Sigma}(t)$), а саме процесів підвищення ефективностей експлуатації ($Q(P_{esmpi}(t))$), проведення технічних обслуговувань ($Q(E_{mcosmpi}(t))$) та в частині використання палива, технологічних рідин, витратних матеріалів, запчастин в умовах експлуатації ($Q(E_{upfcsi}(t))$), буде вважатись поєднання як об'єктивних, так і суб'єктивних експлуатаційних факторів експлуатації суднових теплообмінних апаратів в системі експлуатації на основі технології цифрових двійників. Це забезпечує забезпечують працездатність всієї енергетичної системи судна і суднової енергетичної установки саме через мінімальне значення витрати палива (G_{Pt}). Об'єктивні фактори залежать від особливостей теплообмінників в частині: конструктивного виконання, площ теплообміну (кількості і якості пластин теплообмінника), витрати теплоносіїв (масову витрату в об'ємну витрату), коефіцієнтів тепловіддачі, товщини забруднення пластинчастого теплообмінника, швидкості теплообміну тощо. Суб'єктивні фактори системи залежать від технічного стану обладнання суднових теплообмінних апаратів, суднової енергетичної установки і судна взагалі, та режимів управління, експлуатації, технічного обслуговування тощо. Крім цього функція повинна забезпечувати поєднання з іншими частинами запропонованого підходу.

Запропоновану функцію дослідження можливо представити у вигляді:

$$\begin{cases} Q_{\Sigma}(t) = \Sigma(Q(P_{esmpi}(t)) + Q(E_{mcosmpi}(t)) + Q(E_{upfcsi}(t))) \rightarrow \max \\ Q(P_{esmpi}(t)) = F(F_{SMIsp}, DR_{Lt_i}, S_{OSPP}, P_{Dui}) \rightarrow \max \\ Q(E_{mcosmpi}(t)) = F(F_{SMIsp}, S_{OSPP}) \rightarrow \max \\ Q(E_{upfcsi}(t)) = F(F_{SMIsp}, DR_{Lt_i}, S_{OSPP}, P_{Dui}) \rightarrow \max \\ G_{Pt} \rightarrow \min \end{cases} \quad (2)$$

Особливістю запропонованої функції є те, що при її реалізації одночасно вирішується мінімалістична і максималістична, тобто мінімаксна, задача. Вирішуються одночасно такі задачі: забезпечення технічного стану $Q_{i\sigma}(t)$ вантажного транспортного судна, його енергетичної установки та в окремих складових, компонентах, механізмах і системах при відтворенні процесів гарантування ефективності експлуатації, проведення технічних обслуговувань та в частині використання палива, технологічних рідин, витратних матеріалів, запчастин тощо прагне досягти максимуму, при тому що G_{pt} прагне досягти мінімально можливих значень. При урахуванні факторів, що впливають на досягнення вказаних параметрів, можливо виділити конструкційні фактори і особливості вантажного транспортного судна, його енергетичної установки та в окремих складових, компонентах, механізмах і системах, їх технічний стан, фактичні умови експлуатації і режими управління (обслуговування і ремонту). Кожен з основних факторів впливу має суттєві особливості у своєму складі. Заходи в частині оцінювання і прогнозування стану судових теплообмінних апаратів в системі експлуатації повинні бути оптимізовані в частині технологічних налаштувань, технічного стану, процесів технічних обслуговувань, відновлення працездатності тощо і по завершенні повинні також мінімізовані у часі і витраті матеріалів і запасних частин на їх відновлення. Для використання в дослідженні методів і засобів дистанційного моніторингу планується виконати також аналіз особливостей його реалізації та дистанційного контролю параметрів технічного стану й визначення критеріїв покращення реалізації поставлених завдань в частині самих теплообмінних апаратів в умовах експлуатації засобами оперативного контролю на основі інтелектуальних і комунікаційних технологій. У процесі оцінювання і прогнозування параметрів працездатності і технічного стану судових теплообмінних апаратів в системі їх експлуатації на основі технології цифрових двійників інформаційна система передбачає уточнення інформації про фактичний технічний стан судових теплообмінних апаратів, методи й засоби їх оцінювання і прогнозування параметрів працездатності, про перспективи їх застосування при зміні умов експлуатації тощо.

Особливості реалізації оцінювання і прогнозування стану судових теплообмінних апаратів в системі експлуатації на основі технології цифрових двійників. В статті об'єктом досліджень була суднова енергетична установка судна-танкера «Sti Fulham» (номер IMO 9688374, номер MMSI 538005400), яке призначено для перевезення нафти та хімікатів [40-42]. Суднова енергетична установка включає головний двигун 6S50ME-B. Досліджувані теплообмінні апарати судової енергетичної установки розглядалися для центральної системи охолодження головного судового двигуна [41-43].

Для запобігання занадто високої температури

охолоджуючого середовища повітреохолоджувача головного двигуна, розрахункова температура охолоджуючої води центральної системи охолоджуючої води повинна бути не вище 36°C. Це відповідає найвищій температурі для заборотної морської води + 32°C [18-21, 41-43].

За рекомендаціями виробників [41, 43] для збереження сталої температури охолоджуючої води на вході в повітроохолоджувачі головного двигуна потрібно забезпечувати застосування як тільки максимально можливо нижчої температури рідини в центральній системі охолодження. Це означає, що температура охолоджуючої води системи на центральному регулюючому клапані повинна бути встановлена на мінімум 10°C нижче від температури заборотної морської води [42]. Тобто різниця температур не повинна перевищувати +10°C. При цьому виробник для всіх трубопроводів системи охолодження встановлює максимальні швидкості охолоджуючої води системі ~3,0 м / с.

Для реалізації функціоналу дослідження (2) дослідження проводились за 3 послідовними взаємопов'язаними етапами на створеній математичній моделі на основі технології цифрових двійників. Для дослідження спроможності пластинчастого теплообмінника центральної системи охолодження забезпечити експлуатацію головного двигуна судової енергетичної установки для складних (змінних) умов експлуатації судна, а саме при переході в районах плавання (для прикладу): Північне море – Арабські Емірати, Перська затока. В такому випадку температура заборотної води змінюється в діапазоні від +15°C взимку до +36°C влітку (1-й етап). При цьому досліджувались граничні температури в центральній системі і вплив на її забезпечення конструктивних особливостей судового пластинчастого теплообмінника (2-й етап дослідження). Крім цього, проводилось дослідження можливого застосування системи в зоні теплообмінника і пошук шляхів забезпечення роботи пластинчастого теплообмінника при можливому забрудненні (3-й етап дослідження) [41, 43].

На початковому етапі при формуванні цифрового двійника теплообмінного апарата здійснюємо аналітичне обґрунтування і розрахунок технологічних параметрів судового пластинчастого теплообмінника системи охолодження головного судового двигуна. Початкові дані обираємо із відомих початкових і вихідних даних і результатів моніторингу технологічних параметрів технічного стану компонентів системи охолодження та оточуючого середовища. Технологічний розрахунок проводиться за положеннями [4, 17-23, 41-43]. Після отримання результатів технологічного розрахунку і визначення (підтвердження) конструктивного виконання досліджуваного теплообмінника виконуємо моделювання процесів експлуатації пластинчастого теплообмінника для дослідження експлуатаційних режимів роботи [4, 41-43]. Дослідження проводимо на основі отриманих вихідних даних і за методом послідовних наближень (МПН). Розрахунки

будуються за допомогою залежностей, в які входить не середня різниця температур між теплообмінними потоками (середній логарифмічний температурний напір $\Delta t_{\ln}$), а різниця температур гріючого і нагрітого теплоносія на вході в теплообмінник [4, 17-23]. Для цього використовуємо коефіцієнт протічності Z , який знаходимо з рівняння теплового балансу і рівняння теплопередачі. Потім визначаємо фактичну теплову потужність пластинчастого теплообмінника і фактичні температури теплоносія на виході [4, 17-23]. З урахуванням змінних температур знаходимо коефіцієнти тепловіддачі і нове значення коефіцієнта k_{new} теплопередачі [4, 17-23]. За нових значень k_{new} цикл моделювання повторюється. При рівності $k = k_{new}$, при наступній ітерації цикл методу послідовних наближень припиняється; значення, отримані на даному етапі, є реальними значеннями теплообмінного апарату [4]. При прогнозуванні параметрів теплообмінного обладнання за технологією цифрових двійників проводимо моделювання режимів роботи теплообмінника за відповідний період часу при різних температурах заборотної води при заданих параметрах суднової енергетичної установки [4, 42].

Для урахування забруднення в теплообміннику системи охолодження в моделі попередньо враховані і проведені необхідні розрахунки для роботи теплообмінника та внесені відповідні зміни та доповнення до формули визначення коефіцієнта тепловіддачі [4]. Під забрудненням в дослідженні розуміємо накопичення небажаних відкладень на теплообмінних поверхнях суднових теплообмінних апаратів. Наявність таких відкладень створює опір тепловому потоку, а отже, знижує ефективність роботи обладнання та викликає надмірну витрату палива [4, 40]. Найнебезпечнішими з цієї точки зору є забруднення з низькою теплопровідністю [4]. На основі розробленої моделі та програми цифрового двійника отримано дані, які дозволяють візуально оцінити вплив можливого забруднення на коефіцієнт k при його зміні (негативні наслідки) під час роботи теплообмінника. Знання характеристик завищення коефіцієнта необхідно для того, щоб в умовах експлуатації можна було передбачити негативні наслідки досягнення його відповідних (небажаних) значень [4, 17-23]. З математичної точки зору можливо розглядати вплив різних видів забруднень на коефіцієнт теплопередачі k . Для цього при обчисленні k додається додатковий опір – опір теплопередачі шару забруднення [4, 17-23]. Сформована математична модель на основі технології цифрових двійників пластинчастого теплообмінника дозволяє не тільки моделювати його роботу, а й оцінювати, аналізувати роботу і прогнозувати стан теплообмінників в реальних умовах експлуатації. Отримані графічні залежності добре корелюють з реальністю (рис. 1) [4, 41-43]. В основних обчислювальних дослідженнях виконувались такі дослідницькі завдання: перевірка технологічної спроможності робочого процесу пластинчастого теплообмінника відповідно до встановлених термодинамічних умов експлуатації

(найбільш напружений); визначення і оцінювання термодинамічних характеристик і технологічної спроможності робочого процесу вибраного в заданому режимі пластинчастого теплообмінника [4, 41-43]; прогнозування термодинамічних характеристик пластинчастого теплообмінника, вибраного в новому режимі [4, 41-43].

У процесі виконання дослідження і прогнозування стану суднових теплообмінних апаратів в системі експлуатації на основі технології цифрових двійників, для умов прикладу наведеного вище, з'ясували вплив підвищення теплопередачі, температури води на вході на основні технологічні показники роботи пластинчастого теплообмінника (рис. 1). Також на рис. 1 наведені апроксимуючі рівняння для кожного варіанту дослідження для прогнозування можливих результатів в умовах експлуатації теплообмінного обладнання. З результатів розрахункового дослідження видно, що підвищення температури води заборотної морської при вході в теплообмінник призводить до істотних наслідків [4, 41-43].

Також на рис. 1 наведені апроксимуючі рівняння для кожного варіанту дослідження для прогнозування можливих результатів в умовах експлуатації теплообмінного обладнання. З результатів розрахункового дослідження видно, що підвищення температури води заборотної морської при вході в теплообмінник призводить до істотних наслідків [4, 41-43].

Розрахунок проводився з інтервалом температури охолоджуючої рідини 1°C , яка змінювалась на вході в теплообмінник, а саме в його «холодну» частину. Інтервал досліджуваних температур – $+32 \dots +35^{\circ}\text{C}$ (виходячи з технологічних і експлуатаційних вимог виробника СЕУ). В першу чергу досліджувався вплив температур на стабільність експлуатаційних показників системи охолодження. На рис. 1 показані зміни масової витрати теплоносія (а) і втрат тиску (б) в процесі зміни температури на впуску «холодного» теплоносія. Результати дослідження показали, що для теплообмінника зміна (підвищення значень) параметрів впускної «холодної» води призведе до збільшення масової витрати теплоносія особливо в діапазоні температур після 34°C . Аналогічні результати отримані і для втрат тиску в теплообміннику, що підтверджується рис. 1, б.

На рис. 1 показані зміни запасу поверхні на забруднення (е) і максимальної кількості пластин в теплообміннику (г) в процесі зміни температури на впуску «холодного» теплоносія. Це, в свою чергу, суттєво впливає на забруднення теплообмінних поверхонь (рис. 1, е), на зниження швидкості руху робочої рідини в каналах (рис. 1, в) оцінці тиску (рис. 1, б). При цьому наочно видно, що коефіцієнт теплопередачі (рис. 1, д) суттєво зменшується. Виходом із описаної ситуації може бути заздалегідь проведене технічне обслуговування теплообмінника зі збільшенням кількості пластин (збільшенням площі теплообмінної поверхні). Такий варіант, безумовно, дозволить уникнути складну технологічну ситуацію [4, 41-43].

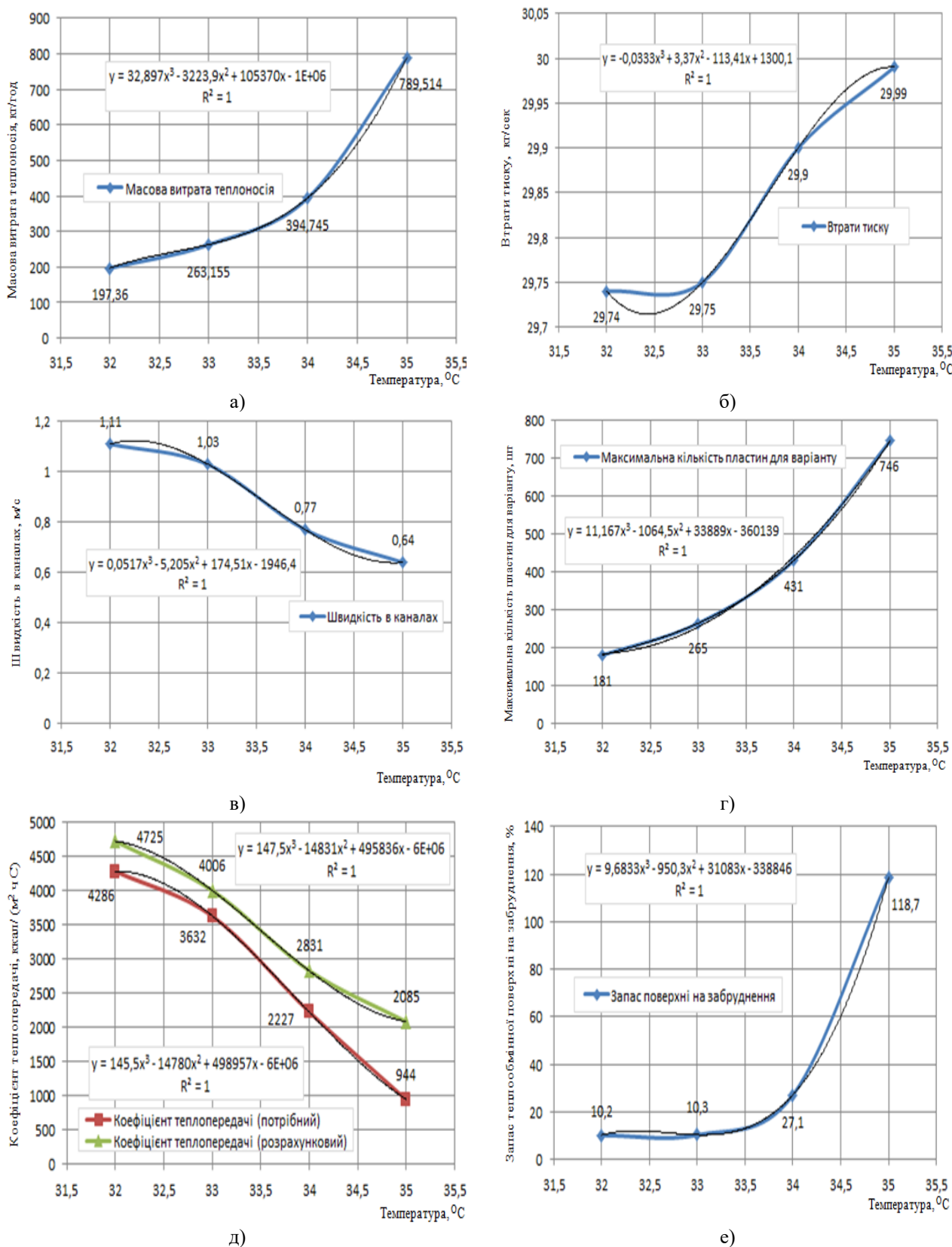


Рис. 1 – Результати розрахункового дослідження суднового пластинчастого теплообмінника в частині зміни: масової витрати теплоносія (а); витрати тиску (б); швидкості в каналах (в); максимальної кількості пластин в пакеті (г); зміни коефіцієнту теплопередачі теплообмінника (д) і запасу теплообмінної поверхні на забруднення (е)

В перспективі планується удосконалити модель для оцінювання і прогнозування стану суднових теплообмінних апаратів в системі експлуатації на основі технології цифрових двійників з метою урахування плану технічних обслуговувань, оцінювання ресурсу теплообмінників при роботі в складних умовах експлуатації тощо.

Висновки

Обґрунтовані і системно ураховані особливості оцінювання і прогнозування стану суднових теплообмінних апаратів у системі експлуатації на основі технології цифрових двійників вантажного судна і суднової енергетичної установки.

Розроблена модель і інформаційна складна система в реалізації задач дослідження, що дозволяє надалі досліджувати укрупненою моделлю представлення цифрового двійника інтелектуальної системи управління експлуатацією вантажного судна та суднової енергетичної установки.

Теоретично та експериментально обґрунтовані реалізації досліджуваного застосування в частині практичних методів формування цифрового двійника для представлення результатів роботи теплообмінного обладнання судна в реальних умовах експлуатації.

Перелік використаних джерел

- [1] Zohuri B. Compact Heat Exchangers: Selection, Application, Design and Evaluation. Switzerland : Springer International Publishing, 2017. 559 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-29835-1>.
- [2] Features of Modeling Thermal Development Processes of the Vehicle Engine Based on Phase-Transitional Thermal Accumulators / I. Gritsuk et al. *SAE Technical Paper*. 2019. Article 2019-01-0906. DOI: <https://doi.org/10.4271/2019-01-0906>.
- [3] Черняк Ю.В., Прилепський Ю.В., Грицук І.В. Фізична модель рекуперативної системи маневрового тепловозу. Донецьк: ДонІЗТ, 2010. 196 с.
- [4] Мікульонюк І. О. Інноваційне теплообмінне обладнання : монографія. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 140 с.
- [5] Теплообмінники з псевдозрідженням сипкого матеріалу (Огляд конструкцій) / Мікульонюк І. О., Карвацький А. Я., Іваненко О. І., Лелека С. В. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»* : сер. «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». 2022. № 3(21). С. 23-38. DOI: <https://doi.org/10.20535/2617-9741.3.2022.265359>.
- [6] Mikulionok I. O. Plate-Type Gas Distribution Grids for Fluidized Bed Apparatuses (Survey of Patents). *Chemical and Petroleum Engineering*. 2021. Vol. 57, № 1-2. Pp. 168-175. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-021-00911-2>.
- [7] Aspects of Forming the Information V2I Model of the Transport Vessel / A. Golovan et al. *IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, 23-25 September 2019. Pp. 390-393. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES.2019.8896595>.
- [8] The Choice of a Rational Type of Fuel for Technological Vehicles / V. Zaharchuk et al. *SAE Technical Paper*. 2018. Article 2018-01-1759. DOI: <https://doi.org/10.4271/2018-01-1759>.
- [9] Cognitive Model of the Internal Combustion Engine / V. Vychuzhanin et al. *SAE Technical Paper*. 2018. Article 2018-01-1738. DOI: <https://doi.org/10.4271/2018-01-1738>.
- [10] The Complex Application of Monitoring and Express Diagnosing for Searching Failures on Common Rail System Units / I. Gritsuk et al. *SAE Technical Paper*. 2018. Article 2018-01-1773. DOI: <https://doi.org/10.4271/2018-01-1773>.
- [11] Особливості моніторингу стану транспортних засобів з використанням бортових діагностичних комплексів / В.П. Матейчик та ін. *Управління проектами, системний аналіз і логістика*. 2014. Випуск 13. С. 126-138.
- [12] Increase of Stability for Motor Cars in Service Braking / M. Podrigalo et al. *SAE Technical Paper*. 2018. Article 2018-01-1880. DOI: <https://doi.org/10.4271/2018-01-1880>.
- [13] Information and analytical system to monitor operating processes and environmental performance of vehicle propulsion systems / Mateichyk V., Sága M., Smieszek M., Tsiuman M. *IOP Conference. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 776(1). Article 012064. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/776/1/012064>.
- [14] Assessment of Operation Speed and Precision of Electropneumatic Actuator of Mechanical Transmission Clutch Control System / M. Mikhalevich et al. *SAE Technical Paper*. 2018. Article 2018-01-1295. DOI: <https://doi.org/10.4271/2018-01-1295>.
- [15] The peculiarities of monitoring road vehicle performance and environmental impact / I. Kuric et al. *MATEC Web of Conferences. Innovative Technologies in Engineering Production*. 2018. Vol. 244. Article 03003. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824403003>.
- [16] Організація технічної експлуатації автомобілів в умовах формування інтелектуальних транспортних систем / В.П. Волков та ін. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Автомобіле- та тракторобудування. 2013. № 29(1002). С. 138-144.
- [17] Головань А. І. Перспективні напрямки та інноваційні підходи управління системою технічного обслуговування вантажних суден. *Розвиток транспорту*. 2023. Вип. 2(17). С. 42-55. DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2023.2-17.04>.

- [18] Головань А. Формування оптимальних параметрів системи технічного обслуговування вантажних суден за рахунок цифрових стратегій. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*. 2023. Вип. 47. С. 297-305. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.47.2023.300116>.
- [19] Головань А. І. Методи кількісної оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден. *Розвиток транспорту*. 2023. Вип. 3(18). С. 113-122. DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2023.3-18.09>.
- [20] Головань А. І. Концептуальна модель планування та оптимізації графіків технічного обслуговування вантажних суден. *Водний транспорт*. 2023. Вип. 1(37). С. 107-115. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.12>.
- [21] Головань А. І. Дослідження впливу комплексної прескриптивної системи та цифрових стратегій на ефективність системи технічного обслуговування вантажних суден. *Водний транспорт*. 2024. Вип. 1(39). С. 112-123. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.11>.
- [22] Головань А. Формування цифрових стратегій для вирішення задач підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*. 2023. Вип. 46. С. 149-158. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.46.2023.288184>.
- [23] Головань А. І. Особливості оцінювання ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2024. Вип. 1(75). С. 5-10. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.1.005>.
- [24] Digital twins-based smart manufacturing system design in Industry 4.0: A review / J. Leng et al. *Journal of Manufacturing Systems*. 2021. Vol. 60. Pp. 119-137. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.05.011>.
- [25] Improving material quality management and manufacturing organizations system through Industry 4.0 technologies / M. Ammar et al. *Materials Today Proceedings*. 2021. Vol. 45. Pp. 5089-5096. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.585>.
- [26] Caiza G., Sanz R. An Immersive Digital Twin Applied to a Manufacturing Execution System for the Monitoring and Control of Industry 4.0 Processes. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14. Article 4125. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14104125>.
- [27] Wan J., Chen B., Wang S. Smart Manufacturing Factory: Artificial-Intelligence-Driven Customized Manufacturing. 1st ed. Boca Raton, FL, USA : CRC Press, 2023. 470 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003460992>.
- [28] Grieves M. W. Product lifecycle management: The new paradigm for enterprises. *International Journal of Product Development*. 2005. Vol. 2. Pp. 71-84. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJPD.2005.006669>.
- [29] Grieves M. W. Product Lifecycle Management. Nova Iorque, Brazil : McGraw-Hill, 2006. 319 p.
- [30] Grieves M. W. Virtually Perfect: Driving Innovative and Lean Products Through Product Lifecycle Management. Cocoa Beach, FL, USA : Space Coast Press, 2011. 382 p.
- [31] Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research / Fuller A., Fan Z., Day C., Barlow C. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. Pp. 108952-108971. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358>.
- [32] Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues / Y. Lu et al. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2020. Vol. 61. Article 101837. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101837>.
- [33] Reinforcement learning and digital twin-based real-time scheduling method in intelligent manufacturing systems / Zhang L., Yan Y., Hu Y., Ren W. *IFAC-PapersOnLine*. 2022. Vol. 55, iss. 10. Pp. 359-364. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.413>.
- [34] Tian L., Liu G., Liu S. Digital twin and production line simulation technology. *J. Graph*. 2021. Vol. 3. Pp. 349-358.
- [35] Digital-Twin-Assisted Optimization of Intelligent Manufacturing Flexible Production Line with Automated Guided Vehicle / R. Xiao et al. *Proceedings of the 2023 42nd Chinese Control Conference (CCC)*, Tianjin, China, 24-26 July 2023. Pp. 5174-5179. DOI: <https://doi.org/10.23919/CCC58697.2023.10240458>.
- [36] A digital twin framework for prognostics and health management / M. Toothman et al. *Computers in Industry*. 2023. Vol. 150. Article 103948. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2023.103948>.
- [37] Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data / F. Tao et al. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. Vol. 94. Pp. 3563-3576. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1>.
- [38] Mahomed A. S., Saha A. K. Unleashing the Potential of 5G for Smart Cities: A Focus on Real-Time Digital Twin Integration. *Smart Cities*. 2025. Vol. 8. Article 70. DOI: <https://doi.org/10.3390/smartcities8020070>.
- [39] Digital twin and its potential application exploration / F. Tao et al. *Computer Integrated Manufacturing Systems*. 2018. Vol. 24. Pp. 1-18. DOI: <https://doi.org/10.13196/j.cims.2018.01.001>.
- [40] Интеграция технической эксплуатации автомобилей в структуры и процессы интеллектуальных транспортных систем: монография / В.П. Волков та ін. Донецк : Изд-во «Ноулидж», 2013. 398 с.
- [41] STI FULHAM. URL: <https://www.balticshipping.com/vessel/imo/9688374> (дата доступу: 15.06.2025).
- [42] MAN B&W S50ME-B9.3-TII. IMO Tier II. Project Guide. 2014. 302 p.

- [43] STI FULHAM. IMO number: 9688374. STI FULHAM - DNV GL Vessel Register. 13.11.2021. 5 p.
- [44] Design and simulation of heat exchangers using Aspen HYSYS, and Aspen exchanger design and rating for paddy drying application / J. Janaun et al. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Chemical and Bioprocess Engineering*, Kota Kinabalu, Malaysia, 9-12 December 2015. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/36/1/012056>.
- [45] Garcia S., Trueba A. Fouling in heat exchangers. *Inverse Heat Conduction and Heat Exchangers*. London, UK: Intechopen Edition, 2019. Pp. 1-27. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.88079>.
- [46] Industrial heat exchanger: Operation and maintenance to minimize fouling and corrosion / T. K. Hou et al. *Heat Exchangers – advanced Features and Applications*. London, UK : Intechopen Edition, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/66274>.

FEATURES OF ASSESSMENT AND PREDICTION OF THE CONDITION OF SHIP HEAT EXCHANGERS IN THE OPERATION SYSTEM BASED ON DIGITAL TWIN TECHNOLOGY

Gritsuk I.V.	D.Sc. (Engineering), professor, Chernihiv Polytechnic National University, Chernihiv, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7065-6820 , e-mail: gritsuk_iv@ukr.net ;
Khudyakov I.V.	PhD (Engineering), associate professor, Kherson State Maritime Academy, Kherson; Chernihiv Polytechnic National University, Chernihiv, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8900-7879 , e-mail: igor.khudiakov563@gmail.com ;
Pogorletskyi D.S.	PhD (Engineering), associate professor, Kherson State Maritime Academy, Kherson; Chernihiv Polytechnic National University, Chernihiv, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1256-8053 , e-mail: dimon150582@gmail.com ;
Chernenko V.V.	senior lecturer, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2013-7058 , e-mail: v.chernenko18@gmail.com ;
Kotov A.I.	senior lecturer, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7648-023X , e-mail: kotovai055@gmail.com ;
Zadorozhnii V.K.	master's student, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: https://orcid.org/0009-0001-0118-1654 , e-mail: zadorozhnii.volodymyr.mmm@gmail.com

One of the main directions for improving marine power plants is to increase their efficiency in the processes of heat energy conversion within individual system components. These processes are governed by the laws of thermodynamics, fluid dynamics, and heat and mass transfer, and they determine the efficiency coefficient of the installation, the amount of heat and harmful emissions, service life, as well as the compactness and overall performance of the systems. Heat exchangers, as essential components of power plants, play a crucial role in shaping these indicators. The need for improvement of ship power plant equipment and heat exchangers has been substantiated, which defines the practical demand for the development, enhancement, and implementation of scientific and technical solutions aimed at intensifying heat transfer processes under ship operating conditions. The features of assessment and prediction of the state of marine heat exchangers in operation are justified and systematically considered, based on the digital twin technology of cargo vessels and ship power plants. A model and an information-based complex system have been developed for addressing the research tasks. This allows further investigation through an aggregated model representing the digital twin of an intelligent management system for the operation of cargo vessels and ship power plants. The theoretical and experimental justification for the studied application has been provided, focusing on practical methods for forming a digital twin to represent the performance of ship heat exchange equipment under real operating conditions. An example of applying this method to an actual ship heat exchanger is presented.

Keywords: information model, digital twin, heat exchanger, cooling system, ship power plant, model, complex system.

References

- [1] B. Zohuri, *Compact Heat Exchangers: Selection, Application, Design and Evaluation*. Switzerland: Springer International Publishing, 2017. doi: [10.1007/978-3-319-29835-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-29835-1).
- [2] I. Gritsuk et al., "Features of Modeling Thermal Development Processes of the Vehicle Engine Based on Phase-Transitional Thermal Accumulators," *SAE Technical Paper*, article 2019-01-0906, 2019. doi: [10.4271/2019-01-0906](https://doi.org/10.4271/2019-01-0906).
- [3] Yu.V. Cherniak, Yu.V. Prylepsyki, and I.V. Gritsuk, *Fizychna model rekuperatyvnoi systemy manevrovoho teplovozu* [Physical model of the regenerative system

- of a shunting diesel locomotive]. Donetsk, Ukraine: DonIZT, Publ. 2010. (Ukr.)
- [4] I.O. Mikulonok, *Innovatsiine teploobminne obladnannya : monohrafiia* [Innovative heat exchange equipment: monograph]. Kyiv, Ukraine: KPI im. Ihoria Sikorskoho Publ., 2023. (Ukr.)
- [5] I.O. Mikulionok, A.Ya. Karvatskii, O.I. Ivanenko, and S.V. Leleka, "Teploobminnyky z psevdozriddzhenniam sypkoho materialu (Ohliad konstrukttsii)" ["Heat exchangers with fluidization of bulk material (Design review)"], *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy «Kyivskiy politekhnichnyi instytut imeni Ihoria Sikorskoho» : ser. «Khimichna inzheneriia, ekolohiia ta resursozbezhezhennia» – Bulletin of National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» Series «Chemical Engineering, Ecology and Resource Saving»*, № 3(21), pp. 23-38, 2022. doi: **10.20535/2617-9741.3.2022.265359**. (Ukr.)
- [6] I.O. Mikulionok, "Plate-Type Gas Distribution Grids for Fluidized Bed Apparatuses (Survey of Patents)," *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 57, № 1-2, pp. 168-175, 2021. doi: **10.1007/s10556-021-00911-2**.
- [7] A. Golovan, I. Gritsuk, S. Rudenko, V. Saravas, A. Shakhov, and O. Shumylo, "Aspects of Forming the Information V2I Model of the Transport Vessel," in *IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, Sept. 23-25, 2019, pp. 390-393. doi: **10.1109/MEES.2019.8896595**.
- [8] V. Zaharchuk et al., "The Choice of a Rational Type of Fuel for Technological Vehicles," *SAE Technical Paper*, article 2018-01-1759, 2018. doi: **10.4271/2018-01-1759**.
- [9] V. Vychuzhanin et al., "Cognitive Model of the Internal Combustion Engine," *SAE Technical Paper*, article 2018-01-1738, 2018. doi: **10.4271/2018-01-1738**.
- [10] I. Gritsuk et al., "The Complex Application of Monitoring and Express Diagnosing for Searching Failures on Common Rail System Units," *SAE Technical Paper*, article 2018-01-1773, 2018. doi: **10.4271/2018-01-1773**.
- [11] V.P. Mateichyk, V.P. Volkov, P.B. Komov, I.V. Gritsuk, A.P. Komov, and Yu.V. Volkov, "Osoblyvosti monitorynhu stanu transportnykh zasobiv z vykorystanniam bortovykh diahnostychnykh kompleksiv" ["Features of monitoring of vehicles state with using of board diagnostic complexes"], *Upravlinnia proektamy, systemnyi analiz i lohistyka – Project Management, Systems Analysis and Logistics*, vol. 13, pp. 126-138, 2014. (Ukr.)
- [12] M. Podrigalo et al., "Increase of Stability for Motor Cars in Service Braking," *SAE Technical Paper*, article 2018-01-1880, 2018. doi: **10.4271/2018-01-1880**.
- [13] V. Mateichyk, M. Sága, M. Smieszek, and M. Tsiuman, "Information and analytical system to monitor operating processes and environmental performance of vehicle propulsion systems," in *IOP Conference. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 776(1), article 012064, 2020. doi: **10.1088/1757-899X/776/1/012064**.
- [14] M. Mikhalevich et al., "Assessment of Operation Speed and Precision of Electropneumatic Actuator of Mechanical Transmission Clutch Control System," *SAE Technical Paper*, article 2018-01-1295, 2018. doi: **10.4271/2018-01-1295**.
- [15] I. Kuric, V. Mateichyk, M. Smieszek, M. Tsiuman, N. Goridko, and I. Gritsuk, "The peculiarities of monitoring road vehicle performance and environmental impact," in *MATEC Web of Conferences. Innovative Technologies in Engineering Production*, vol. 244, article 03003, 2018. doi: **10.1051/mateconf/201824403003**.
- [16] V.P. Volkov, V.P. Mateichyk, P.B. Komov, O.B. Komov, and I.V. Gritsuk, "Orhanizatsiia tekhnichnoi ekspluatatsii avtomobiliv v umovakh formuvannia intelektualnykh transportnykh system" ["Organization of technical operation of vehicles in the context of the formation of intelligent transport systems"], *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: Avtomobile- ta traktorobuduvannia – Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Automobile and Tractor Construction*, № 29(1002), pp. 138-144, 2013. (Ukr.)
- [17] A.I. Golovan, "Perspektyvni napriamky ta innovatsiini pidkhody upravlinnia systemoiu tekhnichnoho obsluhovuvannia vantazhnykh suden" ["Prospective directions and innovative approaches to managing the cargo vessel maintenance system"], *Rozvytok transportu – Transport development*, vol. 2(17), pp. 42-55, 2023. doi: **10.33082/td.2023.2-17.04**. (Ukr.)
- [18] A.I. Golovan, "Formuvannia optymalnykh parametriv systemy tekhnichnoho obsluhovuvannia vantazhnykh suden za rakhunok tsyfrovyykh stratehii" ["Formation of optimal parameters of the cargo ship maintenance system through digital strategies"], *Visnyk Pryazovskoho Derzhavnoho Tekhnichnoho Universytetu. Serii: Tekhnichni nauky – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, vol. 47, pp. 297-305, 2023. doi: **10.31498/2225-6733.47.2023.300116**. (Ukr.)
- [19] A.I. Golovan, "Metody kilkisnoi otsinky efektyvnosti system tekhnichnoho obsluhovuvannia vantazhnykh suden" ["Methods for quantifying the efficiency of cargo ship maintenance systems"], *Rozvytok transportu – Transport development*, vol. 3(18), pp. 113-122, 2023. doi: **10.33082/td.2023.3-18.09**.
- [20] A.I. Golovan, "Kontseptualna model planuvannia ta optymizatsii hrafikiv tekhnichnoho obsluhovuvannia vantazhnykh suden" ["Conceptual model of planning and optimization of cargo vessel maintenance schedules"], *Vodnyi transport – Water transport*, vol. 1(37), pp. 107-115, 2023. doi: **10.33298/2226-8553.2023.1.37.12**.

- [21] A.I. Golovan, "Doslidzhennia vplyvu kompleksnoi preskryptyvnoi systemy ta tsyfrovyykh stratehii na efektyvnist systemy tekhnichnoho obsluhovuvannia vantazhnykh suden" ["Impact of a complex prescriptive system and digital strategies on the efficiency of the cargo ship maintenance system"], *Vodnyi transport – Water transport*, vol. 1(39), pp. 112-123, 2024. doi: **10.33298/2226-8553.2024.1.39.11**.
- [22] A. Golovan, "Formuvannia tsyfrovyykh stratehii dlia vyryshennia zadach pidvyshchennia efektyvnosti system tekhnichnoho obsluhovuvannia vantazhnykh suden" ["Formation of digital strategies for solving problems of increasing the efficiency of cargo ship maintenance systems"], *Visnyk Pryazovskoho Derzhavnoho Tekhnichnoho Universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, vol. 46, pp. 149-158, 2023. doi: **10.31498/2225-6733.46.2023.288184**.
- [23] A.I. Golovan, "Osoblyvosti otsiniuvannia efektyvnosti system tekhnichnoho obsluhovuvannia vantazhnykh suden" ["Features of evaluating the efficiency of cargo vessel maintenance systems"], *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku – Control, Navigation and Communication Systems*, vol. 1(75), pp. 5-10, 2024. doi: **10.26906/SUNZ.2024.1.005**.
- [24] J. Leng, D. Wang, W. Shen, X. Li, Q. Liu, and X. Chen, "Digital twins-based smart manufacturing system design in Industry 4.0: A review," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 60, pp. 119-137, 2021. doi: **10.1016/j.jmsy.2021.05.011**.
- [25] M. Ammar, A. Haleem, M. Javaid, R. Walia, and S. Bahl, "Improving material quality management and manufacturing organizations system through Industry 4.0 technologies," *Materials Today Proceedings*, vol. 45, pp. 5089-5096, 2021. doi: **10.1016/j.matpr.2021.01.585**.
- [26] G. Caiza, and R. Sanz, "An Immersive Digital Twin Applied to a Manufacturing Execution System for the Monitoring and Control of Industry 4.0 Processes," *Applied Sciences*, vol. 14, article 4125, 2024. doi: **10.3390/app14104125**.
- [27] J. Wan, B. Chen, and S. Wang, *Smart Manufacturing Factory: Artificial-Intelligence-Driven Customized Manufacturing*, 1st ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2023. doi: **10.1201/9781003460992**.
- [28] M.W. Grieves, Product lifecycle management: The new paradigm for enterprises, *International Journal of Product Development*, vol. 2, pp. 71-84, 2005. doi: **10.1504/IJPD.2005.006669**.
- [29] M.W. Grieves, *Product Lifecycle Management*. Nova Iorque, Brazil: McGraw-Hill, 2006.
- [30] M.W. Grieves, *Virtually Perfect: Driving Innovative and Lean Products Through Product Lifecycle Management*. Cocoa Beach, FL, USA : Space Coast Press, 2011.
- [31] A. Fuller, Z. Fan, C. Day, and C. Barlow, "Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 108952-108971, 2020. doi: **10.1109/ACCESS.2020.2998358**.
- [32] Y. Lu, C. Liu, K. I.-K. Wang, H. Huang, and X. Xu, "Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 61, article 101837, 2020. doi: **10.1016/j.rcim.2019.101837**.
- [33] L. Zhang, Y. Yan, Y. Hu, and W. Ren, "Reinforcement learning and digital twin-based real-time scheduling method in intelligent manufacturing systems," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 55, iss. 10, pp. 359-364, 2022. doi: **10.1016/j.ifacol.2022.09.413**.
- [34] L. Tian, G. Liu, and S. Liu, "Digital twin and production line simulation technology," *J. Graph*, vol. 3, pp. 349-358, 2021.
- [35] R. Xiao, S. Wang, Z. Liang, X. Zhang, and Y. Xie, "Digital-Twin-Assisted Optimization of Intelligent Manufacturing Flexible Production Line with Automated Guided Vehicle," in *Proceedings of the 2023 42nd Chinese Control Conference (CCC)*, Tianjin, China, July 24-26, 2023, pp. 5174-5179. doi: **10.23919/CCC58697.2023.10240458**.
- [36] M. Toothman et al., "A digital twin framework for prognostics and health management," *Computers in Industry*, vol. 150, article 103948, 2023. doi: **10.1016/j.compind.2023.103948**.
- [37] F. Tao, J. Cheng, Q. Qi, M. Zhang, H. Zhang, and F. Sui, "Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 94, pp. 3563-3576, 2018. doi: **10.1007/s00170-017-0233-1**.
- [38] A.S. Mahomed, and A.K. Saha, Unleashing the Potential of 5G for Smart Cities: A Focus on Real-Time Digital Twin Integration, *Smart Cities*, vol. 8, article 70, 2025. doi: **10.3390/smartcities8020070**.
- [39] F. Tao et al., Digital twin and its potential application exploration, *Computer Integrated Manufacturing Systems*, vol. 24, pp. 1-18, 2018. doi: **10.13196/j.cims.2018.01.001**.
- [40] V.P. Volkov, *Yntehratsyia tekhnicheskoi ekspluatatsyy avtomobylei v strukturi y protsessi yntelektualnikh transportnikh system: monohrafiya* [Integration of technical operation of vehicles into the structures and processes of intelligent transport systems: a monograph], Donetsk, Ukraine: Knowledge Publ., 2013. (Rus.)
- [41] STI FULHAM. [Online]. Available: <https://www.balticshipping.com/vessel/imo/9688374>. Accessed on: June 15, 2025.
- [42] MAN B&W S50ME-B9.3-TII. IMO Tier II. Project Guide. 2014.
- [43] STI FULHAM. IMO number: 9688374. STI FULHAM - DNV GL Vessel Register. 13.11.2021.
- [44] J. Janaun, N.H. Kamin, K.H. Wong, H.J. Tham, V.V. Kong, and M. Farajpourlar, "Design and simulation of heat exchangers using Aspen HYSYS, and

Aspen exchanger design and rating for paddy drying application,” in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Chemical and Bioprocess Engineering*, Kota Kinabalu, Malaysia, Dec. 9-12, 2015. doi: 10.1088/1755-1315/36/1/012056.

- [45] S. Garcia, and A. Trueba, “Fouling in heat exchangers,” in *Inverse Heat Conduction and Heat Exchangers*. London, UK: Intechopen Edition, 2019. doi: 10.5772/intechopen.88079.

[46] T.K.H. Teng, S.N. Kazi, A.B. Mahat, B.T. Chew, A. Al-Shamma’a, and A. Shaw, “Industrial heat exchanger: Operation and maintenance to minimize fouling and corrosion,” in *Heat Exchangers – advanced Features and Applications*. London, UK: Intechopen Edition, 2017. doi: 10.5772/66274.

Стаття надійшла 12.08.2025

Стаття прийнята 30.08.2025

Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: Особливості оцінювання і прогнозування стану суднових теплообмінних апаратів в системі експлуатації на основі технології цифрових двійників / І. В. Грицук та ін. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 51. С. 275-290. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344965>.