

УДК 620:178.3

## ЗАСТОСУВАННЯ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У СУДНОРЕМОНТІ ТА ТРАНСПОРТНІЙ ІНФРАСТРУКТУРІ

**Шарко О.**, д.т.н., порф., Херсонська державна морська академія, м. Херсон, Україна, e-mail: mvsharko@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9025-7990;

**Степанчиков Д.**, к.т.н., доц., Херсонський національний технічний університет, м. Херсон, Україна e-mail: dmitro\_step75@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5027-2213;

**Шарко А.**, Ph.D., Технічний університет м. Ліберець, Чеська Республіка, e-mail: artem.sharko@tul.cz, ORCID: 0000-0002-6350-7189;

**Яненко А.**, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, Україна, e-mail: yanenko9494@gmail.com; ORCID: 0009-0004-7992-8369;

**Мовчан П.**, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, Україна, e-mail: mpv01121988@gmail.com; ORCID: 0009-0003-1004-6651.

*Запропоновано систему багатокритеріального аналізу визначення основних характеристик бетонної суміші для судноремонту і транспортної інфраструктури в реальному часі. Її переваги полягають у масштабованості та адаптивності до робочих навантажень. Обчислювальною основою розрахунків стала цифровізація технології дослідження та аналізу фізико-механічних властивостей бетонних сумішей. Розроблено алгоритм багатокритеріального аналізу при дослідженні термодинамічних процесів у судноремонті. Визначено оптимальний склад структурних елементів сумішей для заданої технології їх виробництва. Проведені експерименти та обчислення показали, що використання результатів дослідження у поєднанні з критеріями оптимізації є основою підвищення достовірності оцінювання параметрів термодинамічних процесів та оптимізації міцнісних властивостей бетонної суміші, визначення складу та структури матеріалів за зміни технології їх виробництва. Моделювання параметрів цільової функції для судноремонту та транспортної інфраструктури засвідчило перевагу цифровізації технологій під час аналізу властивостей бетонних сумішей, де кінцевий результат найкраще поєднує в собі результати експериментальних досліджень та їхнього математичного опрацювання. Представлена система застосування багатокритеріального аналізу при дослідженні термодинамічних процесів у судноремонті та транспортній інфраструктурі являє собою набір статистичної експертної інформації, в якій якісна слабоструктурована сторона визначається через вагове зміст аналізованих термодинамічних властивостей, що підлягають експертній оцінці, а критеріальні методи використовуються для одержання остаточного висновку. Кінцевий результат є адаптацією обох додатків.*

**Ключові слова:** багатокритеріальний аналіз; склад; оптимізація; термодинамічні процеси; судноремонт; транспортна інфраструктура.

**DOI: 10.33815/2313-4763.2024.1.28.117-132**

**Вступ.** Залізобетонний судноремонт – один із напрямів розвитку суднобудування, що займається використанням бетону і залізобетону як основного матеріалу для виробництва корпусів морських і річкових плавзасобів різних призначень. Зведення бетонних плавучих споруд, доків, дебаркадерів тощо має високу економічність порівняно з металевими конструкціями. Судноремонтні підприємства мають свою специфіку, розташовуючись акваторіями для відстою суден, причальними лініями, обслуговуючими господарствами, суднопідйомним обладнанням. Піонером у будівництві залізобетонних суден були Туреччина і Китай. У зв'язку із загостренням дефіциту тоннажу чинного флоту і нестачею промислових запасів сталі займалися будівництвом кораблів і суден, морських буксирів, самохідних поромів і моторних баркасів такі розвинуті країни, як США, Великобританія, Італія, Німеччина, Франція, Норвегія, Швеція, Данія із загальним тоннажем понад 600 тис. тонн. У повоєнний час у Німеччині було спущено на воду п'ятсот 300-тонних суховантажів для суден у Північному морі, на Балтиці та вздовж Норвезького узбережжя.

Корпуси таких суховантажів продемонстрували високу стійкість до динамічних навантажень (рис. 1).

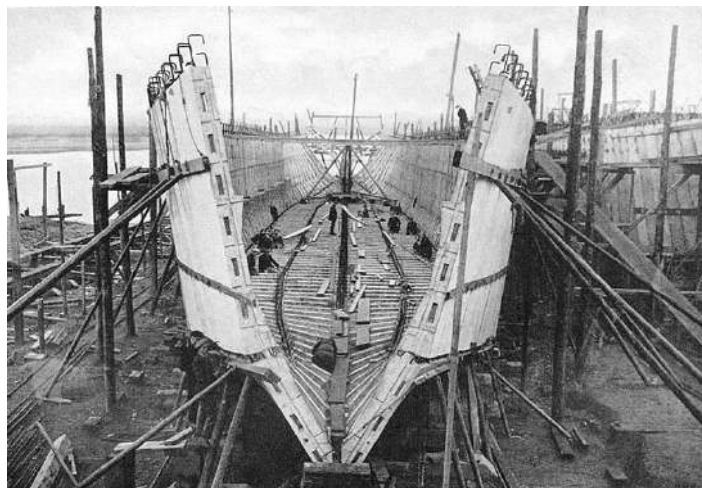


Рисунок 1 – Споруда корабля з бетону США erasvite.org

Найефективнішими в сучасному світі залишаються плавучі засоби із залізобетону та їхнє використання при перевезенні різноманітних вантажів як величезних плавучих понтонів у гаванях, у наведенні переправ і понтонів дає змогу існувати їм у сучасному світі (рис. 2).



Рисунок 2 – Плавучі споруди з бетону: а) бетонне річкове судно б) баржа на Рейні

Бетонні та залізобетонні конструкції морського і водного транспорту складаються зі шлюзів, гребель, насосних станцій, причалів, набережних, гідротехнічних споруд і судноремонтних підприємств, а також будівель і споруд з транспортною інфраструктурою (рис. 3).



Рисунок 3 – Морська транспортна інфраструктура: а) набережна, б) причал

Досвід будівництва та експлуатації морських портових споруд показує, що обґрунтоване визначення параметрів на етапі виготовлення конструкцій дає змогу забезпечити практично безремонтний термін експлуатації [1, 2].

Зведені плавучі споруди із залізобетону (доки, дебаркадери) володіють вищою ефективністю порівняно з металевими конструкціями з бетонних будівельних елементів, їхньою підвищеною довговічністю і спрощеною технологічною базою.

Економія ресурсів у залізобетонному суднобудуванні особливо загострилася через постійне зростання цін на цемент. Стає актуальним застосування сировини різного походження, що узгоджується як з економічними, так і з екологічними вимогами. Відомі публікації щодо використання як в'язучого сірки. Використання сірки як будівельного матеріалу знаходить своє застосування в конструкціях різного призначення, що експлуатуються у важких умовах впливу поперемінного заморожування та відтавання, зволоження та висушування, агресивних сольових розчинах під час дії статичних і знакозмінних навантажень. Виділяється як самостійне наукове завдання вибір оптимального складу придатного для використання в суднобудуванні з урахуванням природно-сировинної бази [3, 4]. Різновидом бетонних сумішей, які застосовують у транспортному суднобудуванні та судноремонті, є сіркобетон – штучний композиційний матеріал, який складається з інертних заповнювачів, які виконують роль каркасу, та сіркоцементу, який є сполучним матеріалом для всієї композиції. Як інертні заповнювачі сіркобетону використовують щільні гірські породи, штучні та природні пористі матеріали, відсів дроблення гірських і осадових порід.

Перехід до збірного залізобетонного суднобудування ґрунтувався на технології побудови суден із плоских секцій. При цьому ліквідувалися сезонні роботи на верфях залізобетонного суднобудування і зменшувався стапельний період. Світовий досвід використання залізобетону характеризується крім удосконалення конструктивних рішень роботами, пов'язаними із застосуванням нових перспективних матеріалів на основі легких керамічних заповнювачів, фібробетонів [5], самоущільнювальних бетонів [6, 7], полімербетонів.

Інтерес до транспортного бетонного суднобудування пов'язаний з появою нових конструкційних матеріалів, таких як композитні матеріали, і розвитком технології бетонних суднобудівних робіт. Плавучий композиційний док "Паллада 5000TLC" (рис. 4) може забезпечувати докування всіх типів цивільних суден з доковою масою до 5000 т., довжиною 120 метрів, а також військових кораблів типу корвет і легкий фрегат, дизель-електричних підводних човнів.



Рисунок 4 – Плавучий композиційний док Паллада 5000TLC

Понтон дока виготовлений із залізобетону із застосуванням сульфатостійкого портландцементу і спеціальних добавок. Керування баластними операціями забезпечує комп'ютерна система, що здійснює постійний контроль за станом судна на доці. Такий стан матеріалів дає змогу знизити витрати на обслуговування в 2–2,5 рази порівняно з аналогічними сталевими спорудами і виключає необхідність ставити їх періодично в сухий док під час усього терміну експлуатації, який становить понад 50 років.

**Постановка проблеми.** Досягнення екстремуму однієї з властивостей супроводжується зменшенням інших властивостей на певну величину. Однак навіть у цьому випадку точка оптимальної постановки визначається з великою похибкою. Перспективним напрямком використання бетонних сумішей є матеріали, що мають практичну

безусадковість, пластичність, підвищену адгезію, низький коефіцієнт температурного розширення. Застосування таких спеціальних бетонів забезпечує довговічність і значне збільшення міжремонтних термінів. Пошук оптимального складу бетонів з високими характеристиками міцності та експлуатаційними властивостями стає актуальною проблемою. Оброблення інформації пов'язано з кількісними параметрами, використовуваними як вхідні змінні, і параметрами, що мають тільки якісний опис. В основу цієї роботи покладено поєднання експериментальних результатів з їхньою обробкою методами багатокритеріальної оптимізації.

**Мета та задачі дослідження.** Метою роботи є моделювання фізичних і технологічних параметрів бетонних сумішей за допомогою багатокритеріальної оптимізації.

Завданнями роботи є:

- складення апріорної експертної інформації про зміну фізико-механічних властивостей у функції від часу затвердіння;
- встановлення критеріїв оптимізацію та необхідних згорток;
- побудова системи багатокритеріальної оптимізації.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Ідентифікацію структурних особливостей механізмів деформування під час вигину представлено в [8, 9]. Оптимізацію складів цементних дисперсійно-армованих дрібнозернистих бетонів, які містять вуглецеві наномодифікатори, запропоновано в [10, 11]. Недоліком представлених робіт є ігнорування багатокритеріального підходу до оцінки складу бетонних сумішей.

Технологію та рецептуру отримання пористих структур армованих композитів описано в [12]. Методику оптимізації матричного складу, що впливає на механічні властивості композитів з вуглецевими волокнами, представлено в [13]. Багатокритеріальні оцінки складу і властивостей дерев'яних конструкцій даються в роботі [14]. Багаторівневу комплексну ієрархічну комплексну систему структурної оптимізації для нафтової та хімічної індустрії з урахуванням ризику і невизначеності представлено в [15]. Зазначається серйозна обчислювальна складність отримання результатів та їх ідентифікації. Використання методу дискретних елементів для оцінки складу і властивостей асфальтобетонних сумішей описано в [16]. У [17] представлено структуру мультидисциплінарного оптимізаційного алгоритму для визначення структури ламінованих композитів. У [18] виконано оцінку змін структури решіток композитів під час навантаження. У [19, 20] наведено методику оптимізації складу композитних матеріалів з використанням багатокритеріального аналізу.

Основними методами багатокритеріальної оптимізації, використовуваними в цитованих джерелах, є згортка критеріїв, оптимізація за основними критеріями і метод послідовних поступок. Практичне застосування критеріальних методів широке й різноманітне. Основним недоліком глобальної оптимізації всіх параметрів геополімера є висока обчислювальна складність цільових функцій. Для більшості практичних задач оптимізації аналітичні вирази граничних функцій невідомі. Нерозв'язаною частиною загальної проблеми побудови систем багатокритеріальної оптимізації є їхня еквівалентність у разі заміни початкових критеріїв загальними агрегованими критеріями.

**Виклад основного матеріалу.** Матеріал і метод. Від правильності вибору складу бетону, призначеного для суднобудування, залежать технологічні показники сумішей: міцність, щільність, непроникність, морозостійкість, а також корозійна стійкість бетону. Звичайні пропорції цементу 10...15% води і наповнювачів 85–90% всієї маси. Наповнювачами виступають пісок, гравій, щебінь, керамзит, подрібнені гірські породи.

Цементи, які використовують для суднобудівного бетону, мають забезпечувати можливість отримання необхідних властивостей. Використовуються: сульфатостійкий портландцемент, пластифікований портландцемент, гідрофобний портландцемент. Після виготовлення міцність бетону зростає особливо швидко протягом 7–14 діб. За температури 15...25°C і відносної вологості навколишнього повітря 90–100% суднобудівний бетон досягає необхідної водонепроникності через 28 діб. Склад бетонної суміші встановлюють виходячи із заданих показників пластичності, статистичної та динамічної міцності затверділої

композиції, непроникності для рідкої фази, стійкості до впливу морської та прісної води. Особливість суднобудівного бетону для плавучих споруд полягає в тому, що під час тривалих будівництв він піддається навантаженням через 90 і 180 діб і більше. За цей час його міцність продовжує збільшуватися.

Склади бетонних сумішей встановлюють у лабораторних верфях з урахуванням місцевих виробничих умов і матеріалів, що застосовуються для виготовлення бетону. Під час виготовлення конструкції якість бетону контролюють перевіркою відповідності матеріалів, що застосовуються, технічним вимогам стандартам і нормативам. Вони встановлюють вимоги до компонентів бетону і методу їх випробувань. Рухливість сумішей визначають за допомогою стандартного усіченого конуса, у якого діаметр нижньої основи 200 мм, верхньої 100 мм, висота 300 мм, конус відкритий зверху і знизу. Для визначення рухливості бетонної суміші конус встановлюють на гладкому металевому листі. Після того, як конус знято, бетонна суміш вивільняється з форми. Величина розтікання суміші характеризують легкоукладальність. Якісною характеристикою бетонної суміші є її усадка. Величина річної усадки бетону становить 0,2–0,4 мм на один погонний метр. Вона залежить від характеристик цементу, заповнювачів водоцементного відношення. Ці значення характеристик бетону забезпечуються ретельністю дотримання технологій виготовлення. Характеристикою бетонної суміші є зв'язність і рухливість. Склад бетонної суміші підбирають таким чином, щоб вона була однорідною і не розшарувалася під час транспортування та укладання. Вона зростає при збільшенні витрати цементу і зменшенні водоцементного відношення. Рухливість бетонної суміші характеризують здатність розтікатися під дією власної ваги зберігаючи однорідність. Вона зростає при збільшенні кількості води і пластифікуючих добавок.

Представлено зведену таблицю фізико-механічних властивостей і технологічних параметрів термодинамічних процесів отримання суднобудівних бетонів (табл. 1).

Таблиця 1 – Фізико-механічні властивості та технологічні параметри термодинамічних процесів отримання суднобудівних бетонів

<i>Склад</i>	<i>Фізико-механічні властивості</i>	<i>Технологічні властивості</i>	<i>Регульовальні способи</i>	<i>Діагностичні операції</i>
Цемент, вода, наповнювачі: гравій, щебінь, керамзит, кварцовий пісок	Статистична та динамічна міцність (15...20 МПа)	Затвердіння	Витримка в часі: Різка зміна 7...14 діб Остаточна 28 діб	Експерименти в лабораторних верфях, врахування місцевих виробничих умов
	Міцність на стиск і вигин (10...50 МПа)	Утворення навантаженої суміші	Готовність до експлуатації 90...180 діб	Відповідність технічним вимогам і стандартам
Сульфатостійкий портландцемент, пластифікований портландцемент, гідрофобний портландцемент	Пластичність	Удобоукладальність	Введення пластифікуючих добавок та їх варіювання	Визначення рухливості методом усіченого конуса
	Непроникність для рідкої фази	Усадка	Збільшення витрати цементу	Контроль розтікання
	Щільність	Зв'язаність	Зменшення водоцементного відношення	Контроль розшарування
	Теплопровідність 2,04 Вт/мс	Теплопроникність	Регулювання вологості	Теплотехнічні розрахунки
	Трещиностійкість	Стиранність	Регулювання пористості та щільності	Варіювання добавок в'язучої речовини

Як методи дослідження використовували експериментальну інформацію в поєднанні з кількісними оцінками багатокритеріальної оптимізації.

**Розв'язання задач для забезпечення досягнення поставленої мети.** На стадії виготовлення залежно від фаз твердіння бетону змінюються параметри теплоємності та теплопровідності бетонної суміші. Змінюється також рівномірність розподілу температурних параметрів у бетонованому об'ємі. Виникаючі напруги створюють мікродфекти, які знижують міцнісні властивості бетонної суміші. Від вибору оптимальних термодинамічних процесів отримання бетонних сумішей залежно від їхнього складу залежать властивості міцності: межі міцності на вигин і стиск, ударна в'язкість і густина матеріалу. Дослідження термодинамічних процесів, що застосовуються в судноремонті та транспортній інфраструктурі, обмежується емпіричним добором складу компонентів і встановленням діапазонів їх зміни. Алгоритм наявних технологій вибору оптимальної рецептури бетонних сумішей представлений на рис. 5.



Рисунок 5 – Алгоритм наявних технологій вибору оптимальної рецептури бетонних сумішей

Існуючі методи оцінки складу бетонних сумішей не враховують додаткові значення, знайдені шляхом емпіричного спостереження. Це істотно знижує ефективність методів оптимізації за множинними критеріями, оскільки ухвалення рішень відбувається в умовах невизначеності та ризику. Тому необхідна модернізація методів багатокритеріальної оптимізації, що полягає в переході від векторної оптимізації до скалярної. Ця операція перетворює функції згортки якісних критеріїв на єдину узагальнюючу. Ухвалення рішень щодо складу суміші за невизначених вхідних даних починається з побудови матриці виграшів  $R$ . Методологічною основою алгоритму побудови операцій визначення складу бетонних сумішей є побудова платіжної матриці або матриці виграшів  $R$ .

$$R = \begin{pmatrix} & P_1 & P_2 & \dots & P_n \\ q_1 & \delta y_{11} & \delta y_{12} & \dots & \delta y_{1n} \\ q_2 & \delta y_{21} & \delta y_{22} & \dots & \delta y_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_m & \delta y_{m1} & \delta y_{m2} & \dots & \delta y_{mn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

де  $q_1, \dots, q_i, \dots, q_m$  – ваговий склад компонентів проби,  $P_1, \dots, P_i, \dots, P_n$  – аналізовані експлуатаційні параметри, що аналізуються,  $\delta y_{ij}$  – відносне відхилення  $j$ -го параметра від оптимального значення.

При визначенні елементів матриці необхідний перехід від векторних до скалярних оцінок. Для цього використовують функції згортки векторних аргументів [21]. Для визначення елемента матриці використовують оцінку скалярного вектора. У цьому разі необхідний перехід від оцінки вектора до скаляра об'єктів. Функції, які використовують під час розв'язання багатокритеріальної задачі, являють собою функції згортки векторних аргументів  $y_i = (y_{i1}, \dots, y_{ij}, \dots, y_{in})$  у скаляри  $\delta y_{ij} = f(y_i)$ . Згортка векторного аргументу слугує для зменшення кількості критеріїв. Її мета – замінити вихідні критерії загальними критеріями. Обов'язковою умовою використання агрегації критеріїв є встановлення їх ранжування. При цьому слід використовувати операцію нормалізації, яка необхідна для компенсації малих значень одних критеріїв більшими значеннями інших критеріїв

$$f_u(y_i) = \sum_{j=1}^n \Delta y_{ij} \quad (2)$$

Найпростішою скалярною функцією, що забезпечує лінійний порядок об'єктів, яка формується за граничною важливістю ознак.

$$\delta y_{ij} = \begin{cases} \frac{|y_{ij} - c_j|}{y_{j,\max} - c_j}; & y_{ij} > c_j; \\ \frac{|y_{ij} - c_j|}{c_j - y_{j,\max}}; & y_{ij} < c_j. \end{cases} \quad (3)$$

де  $i$  – номер рядка;  $j$  – номер стовпця матриці.

Як цільові параметри оптимізації слід вибирати найкращі значення, які можуть бути досягнуті в експериментальній вибірці. Вони визначаються з фізичного змісту розв'язуваної задачі оптимізації – це можуть бути максимальні, мінімальні або середні значення з експериментальної вибірки. За такого підходу формула змістить цілі величини щодо шкали  $(0,1)$ . Водночас слід зазначити, що за такого підбору елементів матриці виникає їхній збіг зі спостережуваними експериментальними значеннями. Однак за такого добору параметрів відповідні елементи матриці збігаються з обов'язково спостережуваними значеннями. Використання суми згортки призводить до втрати відповідної ознаки із загальної оцінки об'єкта, а використання добутку згортки призведе до зменшення до 0. Далі слідує розширення верхньої максимальної та нижньої мінімальної межі кожної ознаки на цей самий відсоток. Така скалярна оптимізація потребує використання відповідних знань про масштаби вагових коефіцієнтів та їхній вплив на результати оптимізацій.

Оскільки ці знання залежать від предметної області, порядок об'єктів у  $n$ -вимірному просторі не може бути явно визначений. Тому актуальним є вивчення впливу властивостей узагальнених цільових функцій, характеристичних масштабів і вагових коефіцієнтів на результати оптимізації. У теоретичному аналізі використано такі узагальнювальні багатокритеріальні функції корисності, які є узагальнювальними.

Аддитивна згортка

$$\delta y_i = \sum_{j=1}^n \omega_j \delta y_{ij} \quad (4)$$

де  $\omega_j$  – важливість (ваговий коефіцієнт)  $j$ -ї ознаки,  $\sum_{j=1}^n \omega_j = 1$ .

Степенева мультиплікативна згортка

$$\delta y_i = \prod_{j=1}^n (\delta y_{ij})^{\omega_j} \quad (5)$$

Додаткова мультиплікативна згортка

$$\delta y_i = 1 - \prod_{j=1}^n (1 - \omega_j \delta y_{ij}) \quad (6)$$

Найкращим об'єктом вважається той, що має мінімальні значення функцій.

Критерій Севіджа (Вальда) (мінімум-максимум)

$$Z_v = \min_i \max_j \delta y_{ij} \quad (7)$$

Критерій Лапласа (мінімум-мінімум)

$$Z_L = \min_i \min_j \delta y_{ij} \quad (8)$$

Критерій Гурвіца

$$Z_{hw} = \min_i \left\{ \rho \min_j \delta y_{ij} + (1 - \rho) \max_j \delta y_{ij} \right\} \quad (9)$$

де  $0 \leq \rho \leq 1$  – індикатор песимізму в розрахунках приймався рівним 0,5.

Аддитивна згортка (4) синтезує сумарну величину приватних показників з урахуванням важливості. Пряма мультиплікативна функція (5) відображає рівномірність приватних показників. Додаткова мультиплікативна згортка (6) має зворотну властивість. Критерій Севіджа забезпечує одержання гарантованого результату в найбільш невідгідній ситуації. Розглядається найнесприятливіша ситуація, при цьому виключається як надмірний вигреш, так і програш. Його доцільно використовувати в екстремальних ситуаціях, коли рішення ухвалюють тільки один раз, без можливості коригувати ситуацію і виправити первісне рішення. Критерій Лапласа має назву критерію нестримного оптимізму. Він не враховує можливі негативні шляхи розвитку ситуації та виключає можливість крайнього програшу. Прагнення до максимального виграшу є визначальним, хоча величини різання при його використанні великі.

Критерій Гурвіца є основою ухвалення стратегічних рішень при встановленні діапазону результатів досліджень від значень крайнього оптимізму до значень крайнього песимізму. Критерій Гурвіца пов'язаний із введенням вагового параметра  $0 \leq \rho \leq 1$ , який називають індексом песимізму. Для будь-якої альтернативи вибір найгіршого визначається з імовірністю  $\rho$ , а найкращий вибір робиться з імовірністю  $(1 - \rho)$ . За  $\rho = 0$  критерій Гурвіца в максимумі збігається з критерієм Лапласа, а за  $\rho = 1$  – з критерієм Вальда в максимумі. Недоліком цього критерію є те, що він враховує тільки два результати – найгірший і найкращий.

Крім того, існують труднощі з визначенням індексу песимізму  $\rho$ . Передбачається, що кожна раціональна людина, яка ухвалює рішення, повинна вибрати відповідні максимальні або мінімальні стратегії. Основними етапами побудови системи оптимізації складу суміші стали: експериментальні вимірювання, математичні розрахунки, зберігання та обмін інформацією, інтерпретація результатів. Алгоритм багатокритеріального аналізу під час дослідження термодинамічних процесів у судноремонті та транспортних технологіях наведено на рис. 6.





Рисунок 6 – Алгоритм багатокритеріального аналізу під час дослідження термодинамічних процесів у судноремонті та транспортних технологіях

Метод згортки критеріїв полягає в перетворенні векторного критерію на скалярний і проявляється в заданні коефіцієнтів початкових критеріїв та їх подальшій екстремізації на множині допустимих варіантів. Згортка являє собою середньозважене значення вихідних критеріїв. Умовою її використання є приведення до єдиної шкали, тобто нормалізація. За однокритеріальної або скалярної оптимізації одна цільова функція визначається для набору варіантів рішення. У багатокритеріальній оптимізації таких функцій кілька. Вони утворюють векторний критерій.

**Експеримент.** Випробування на стиск проводять відповідно до стандарту AS 1012.9 з використанням циліндричних форм діаметром (Ø46 x 92) мм (рис. 7).

Щільність матеріалів вимірюється шляхом ділення маси зразка на його об'єм. Навантаження контролюється зміщенням із постійною швидкістю 2,4 мм/хв для всіх випробувань. Для отримання різних механічних властивостей, необхідних для багатокритеріальної оптимізації складу, змінювали умови затвердіння від початку процесу формування структури суміші через 7, 14, 28, 60, 90 діб. Отримані результати представлені в таблиці 2.



Рисунок 7 – Установка для стрес-тестування: а) випробувальна машина Instron моделі 4202, б) установка для випробувань на вигин, в) установка для випробування на стиск

Таблиця 2 – Механічні властивості бетонних сумішей

Кіль-ть днів	Щільність, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Межа міцності на стиск, $\sigma_c$ , МПа	Міцність на вигин, $\sigma_b$ , МПа	Модуль Юнга, ГПа	Межа міцності на розрив, МПа
7	2301	38.17	51.2	33.14	3.0
	2302	42.14	50.3	31.01	3.1
	2317	45.13	52.6	30.04	3.2
	2361	44.15	50.9	34.19	3.4
	2401	46.12	53.0	35.19	3.3
14	2450	47.14	52.1	35.17	3.3
	2420	46.12	52.9	36.01	3.2
	2400	49.14	51.4	36.90	3.3
	2380	48.16	50.3	35.17	3.3
	2358	50.14	53.1	37.00	3.2
28	2360	52.18	57.1	34.12	3.3
	2400	54.21	56.6	35.01	3.2
	2315	56.24	56.4	37.18	3.4
	2320	56.28	57.4	38.01	3.2
	2305	58.30	58.8	38.00	3.4
60	2302	60.01	54.1	39.02	3.2
	2340	61.12	53.2	38.01	3.3
	2305	58.14	52.1	38.87	3.4
	2300	56.19	54.6	39.19	3.3
	2280	58.35	55.1	41.01	3.5
90	2260	55.11	56.0	38.01	3.5
	2212	57.15	54.1	37.16	3.5
	2230	54.17	52.3	36.18	3.4
	2215	56.15	54.1	37.13	3.6
	2205	57.13	55.2	36.12	3.6

Представлена експериментальна інформація зібрана для суднобудівного бетону марки М500. Діапазони зміни механічних характеристик і тренди їх зміни в різний час затвердіння визначалися з урахуванням вимог ГОСТів і Міжнародних стандартів ISO 3893, ГОСТ 25192, ДСТУБ.В.2.7-176-2008, (EN206-1.2000NEQ). Як нормативні документи використовувалися дані Ост 5.9267-87 "Бетон суднобудівний важкий, загальні вимоги". Згідно з цими документами марку бетону характеризують межа міцності на стиск, на осьове розтягнення, вигин, модуль Юнга і щільність після 28 днів у нормальних вологісних умовах. Для суден і плавспоруд із тривалим терміном побудови допускається марку важкого суднобудівного бетону за міцністю встановлювати у віці бетону 60 і 90 днів. Діапазон зміни густини становить 2300–2450 кг/м<sup>3</sup>, межа міцності на стиск 50–60 МПа, межі міцності на розтягнення 3,4–3,6 МПа, межа міцності на розтягнення під час вигину 55–58 МПа, модуль пружності 35–41 ГПа. Наведені значення у таблиці 2 отримано шляхом екстраполяції строків твердіння та інтерполяції усередині часових інтервалів згідно з відомими трендами.

**Основні результати та обговорення.** Розв'язанням задачі скалярної оптимізації вважається елемент, який максимізує або мінімізує цільову функцію. У разі багатокритеріальної векторної оптимізації відбувається максимізація одного критерію і мінімізація інших. Безліч рішень подається як набір обраних векторів.

Таблиця 3 – Матриця перетворених величин дев'яти механічних характеристик бетонних сумішей

Кіль-ть днів	Щільність, $\omega=0.16$	Межа міцності на стиск, $\omega=0.26$	Межа міцності на вигин, $\omega=0.26$	Модуль Юнга, $\omega=0.16$	Межа міцності на розтягнення, $\omega=0.16$
7	0.4419	1.000	0.9009	0.7275	1.0000
	0.4456	0.8315	1.0000	0.9147	0.8427
	0.5018	0.7046	0.7469	1.0000	0.6855
	0.6666	0.7461	0.9339	0.6353	0.3710
	0.8164	0.6625	0.7029	0.5474	0.5283
14	1.0000	0.6192	0.8019	0.5492	0.5283
	0.8876	0.6625	0.7139	0.4754	0.6855
	0.8127	0.5344	0.8789	0.3971	0.5283
	0.7378	0.5759	1.0000	0.5492	0.5283
	0.6554	0.4919	0.6919	0.3884	0.6855
28	0.6629	0.4053	0.2517	0.6414	0.5283
	0.8127	0.3192	0.3067	0.5632	0.6855
	0.4943	0.2330	0.3287	0.3725	0.3710
	0.5131	0.2313	0.2187	0.2996	0.6855
	0.4569	0.1456	0.0647	0.3005	0.3710
60	0.4456	0.0730	0.5818	0.2109	0.6855
	0.5880	0.0259	0.6809	0.2996	0.5283
	0.4569	0.1524	0.8019	0.2240	0.3710
	0.4382	0.2351	0.5268	0.1959	0.5283
	0.3633	0.1435	0.4718	0.0360	0.2138
90	0.2883	0.2810	0.3728	0.2996	0.2138
	0.1086	0.1944	0.5818	0.3743	0.2138
	0.1760	0.3209	0.7799	0.4604	0.3710
	0.1198	0.2368	0.5818	0.3769	0.0566
	0.0823	0.1952	0.4608	0.4657	0.0566

Методика розрахунку параметрів цільових функцій на основі багатокритеріального аналізу з використанням критеріїв Лапласа, Гурвіца і Вальда вимагає послідовного використання і знаходження експериментальних значень відхилень від пріоритетного розташування цілей.

Так наприклад визначення критеріїв Вальда за формулою (7) використовуючи кількісні дані наведені у другому стовпці в таблиці 4 вибираємо мінімальне значення з усіх максимальних це значення доводиться 0.4569. Аналогічно визначаються результати оптимізації за критерієм Лапласа лише вибираємо мінімум із мінімумів. При обробці даних за критерієм Гурвіца набуваємо значення  $\rho = 0.5$ . Позначення індексу  $\rho$  як індексу стратегії раціонального оптимізму вважається загальноприйнятим у теорії матричних ігор для збереження спільності викладу ми зберегли це формулювання.

Розрахунки проводилися в системі комп'ютерної математики Maple. Результати розрахунків за формулами (3–9) для кожної групи механічних параметрів були виконані з урахуванням вагових коефіцієнтів, отриманих експертним шляхом:

- щільність  $\omega = 0.16$
- межа міцності на стиск  $\omega = 0.26$
- межа міцності на вигин  $\omega = 0.26$
- модуль Юнга  $\omega = 0.16$

- межа міцності на розтягнення  $\omega = 0.16$

На підставі експертних оцінок встановлено оптимальні значення параметрів (максимальні або мінімальні значення з таблиці 2): густина – мінімальна; міцність на стиск, міцність на розтягнення, модуль Юнга – максимальні; Результати розрахунків і значення згорток та критерії визначення оптимальності механічних параметрів геополімерів наведено в таблиці 4. У табл. 4 використано такі позначення:  $y_a$  – адитивна згортка (4);  $y_{ms}$  – мультиплікативна згортка (5);  $y_{md}$  – додаткова мультиплікативна згортка (6); критерій Валда-Вальда (7); критерій Лапласа (8); критерій Гурвица (9). Оптимальні значення критеріїв і згорток виділені жирним шрифтом і кольором.

Таблиця 4 – Значення згорток та критерії визначення оптимальності механічних параметрів геополімерів

Кіль-ть днів	min	max	(max+min)/2	$y_a$	$y_{ms}$	$y_{md}$
7	0.4419	1.0000	0.7209	0.8413	0.8116	0.6091
	0.4456	1.0000	0.7228	0.8287	0.8034	0.6021
	0.5018	1.0000	0.7509	0.7273	0.7134	0.5473
	0.3710	0.9339	0.6525	0.7045	0.6770	0.5393
	0.5283	0.8164	0.6723	0.6577	0.6507	0.5087
14	0.5283	1.0000	0.7641	0.7019	0.6838	0.5342
	0.4754	0.8876	0.6815	0.6856	0.6749	0.5242
	0.3971	0.8789	0.6380	0.6455	0.6191	0.5045
	0.5283	1.0000	0.7641	0.7002	0.6770	0.5366
	0.3884	0.6919	<b>0.5401</b>	0.5844	0.5714	0.4654
28	0.2517	0.6629	0.4573	0.4641	0.4350	0.3860
	0.3067	0.8127	0.5597	0.4926	0.4540	0.4053
	0.2330	0.4943	0.3637	0.3441	0.3338	0.3001
	0.2187	0.6855	0.4521	0.3567	0.3211	0.3103
	0.0647	<b>0.4569</b>	0.2608	<b>0.2352</b>	<b>0.1846</b>	<b>0.2149</b>
60	0.0730	0.6855	0.3792	0.3850	0.2836	0.3348
	<b>0.0259</b>	0.6809	0.3534	0.4103	0.2394	0.3545
	0.1524	0.8019	0.4771	0.4164	0.3430	0.3610
	0.1959	0.5283	0.3621	0.3841	0.3542	0.3318
	0.0360	0.4718	0.2539	0.2581	0.1938	0.2361
90	0.2138	0.5283	0.3710	0.2983	0.2937	0.2658
	0.1086	0.5818	0.3452	0.3133	0.2655	0.2810
	0.1760	0.7799	0.4779	0.4474	0.3982	0.3812
	0.0566	0.5818	0.3192	0.3014	0.2298	0.2726
	0.0566	0.4657	0.2611	0.2673	0.2004	0.2438
	Vald <b>0.4569</b>	Laplas <b>0.0259</b>	Hurwitz <b>0.5129</b>			

Аналіз отриманих результатів дає змогу констатувати, що амортизація згорток (адитивної, мультиплікативної та додаткової мультиплікативної) дає однозначний висновок – оптимальний склад 28 днів. Критерій Вальда також вказує на склад 28 днів. Визначено оптимальні значення характеристик бетонної суміші для судноремонту та транспортної інфраструктури: густина 2305 кг/м<sup>3</sup>, межа міцності на стиск 58.30 МПа, межа міцності на вигин 58.80 МПа, модуль Юнга 38.00 ГПа, межа міцності на розтяг 3.4 МПа. Критерій Лапласа дає оптимальний склад 60 днів. Критерій Гурвица суттєво залежить від коефіцієнта песимізму  $\rho$ , вибір якого суб'єктивний і сильно змінює результат. Тому критерій Гурвица слід вважати допоміжним і не враховувати його невідповідність загальній тенденції.

Слід відмітити, що градація часу затвердження по отриманих фізико-механічних властивостям через 7, 14, 28, 60 і 90 днів з розбивкою на п'ять рівнів є умовною. Така форма обрана для зручності користування результатами дослідження.

### Висновки

1. Відповідно до галузевих вимог бетон для транспортного будівництва повинен мати міцність на стиск, морозостійкість, стійкість до стирання і динамічних навантажень. Розроблення рецептур має враховувати всі потенційні складнощі під час будівництва транспортної інфраструктури. Визначено оптимальні значення характеристик бетонної суміші для судноремонту та транспортної інфраструктури: густина 2305 кг/м<sup>3</sup>, межа міцності на стиск 58.30 МПа, межа міцності на вигин 58.80 МПа, модуль Юнга 38.00 ГПа, межа міцності на розтяг 3.4 МПа. Моделювання параметрів цільової функції для судноремонту та транспортної інфраструктури засвідчило перевагу цифровізації технологій під час аналізу властивостей бетонних сумішей, де кінцевий результат найкраще поєднує в собі результати експериментальних досліджень та їхнього математичного опрацювання.

2. Бетон для транспортного будівництва та судноремонту відрізняється за термодинамічними та фізико-технічними показниками, а також рецептурою, склад якої проектується залежно від категорії об'єкта. Увага, що приділяється рецептурі та якості компонентів, зумовлена умовами експлуатації транспортних об'єктів, у т.ч. доріг і штучних споруд. Пропонована система багатокритеріальної оцінки визначення оптимальних характеристик сумішей містить суб'єктивні та об'єктивні елементи вибору рішення. Цей підхід являє собою новий спосіб опрацювання інформації, що ґрунтується на математичному моделюванні.

**Перспективи подальших досліджень.** Перспектива подальших досліджень полягає у ширшому залученні для аналізу інших критеріїв оптимізації та розширення динаміки технологій та рецептура виготовлення суднобудівного бетону з урахуванням умов його використання.

Іншою не менш важливою перспективою подальших досліджень є напрямок пов'язаний із встановленням причинно-наслідкових зв'язків між технологіями отримання бетонних сумішей їх рецептури та спостереженням за зміною у фізико-механічних властивостей при визначенні оптимальних концентрацій сполучних елементів.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Горохов М. С., Вплив параметрів дисперсійного армування на тріщиностійкість суднових конструкцій з фібробетону. Вісник Державного університету морського та річкового флоту ім. адм. С.О. Макарова, 2014, №1(23), 68–73.
2. Шехоркіна С. Є., Матюшенко І. М., Савицький М. В. Дослідження довговічності залізобетонних понтонів, що експлуатуються на водних об'єктах України. Вісник Підніпровської державної академії будівництва та архітектури. 2013 №1, 2 С. 64–49
3. Гололобов Б. Д. Парашенко А. О., Голозубов Т. В. Використання дисперсійно-армованого фібробетона при виготовленні кришки люка оглядового колодязя Збірник наукових праць ДонНАБА, 2015, вип. 1, с. 32–36.
4. Носков А. С., Філіпов В. П. Беляков В. А. Використання сучасних хімічних домішок при проектуванні складу конструкційного полістіролбетону. Бетон і залізобетон в Україні, 2005, №4(26), с. 13–21.
5. Алменов Х., Хуррамов А. Ч., Софаров Ш. Ш., Мірзаолімов І. Ф. Порівняльний аналіз методики розрахунку на розкриття тріщин у залізобетонних елементах з радіальним армуванням фіброю. Central Asian Research Journal for Interdisciplinary Studies 2022 Vol.2 (3), 449–455.
6. Приходько А. П., Шпілько Н. В., Ульченко Т. В., Берей Ю. Г. Високоміцний самоущільнювальний бетон. Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури, 2012, №2/3, с. 87–94.

7. Сахошко Е. В., Зайченко Н. М. Самоущільнювальний бетон у сучасному монолітному житловому будівництві. Вісник Донбаської державної академії будівництва та архітектури. Макіївка, 2009, вып. 1(75), с. 112–116.
8. Aleksenko V. L., Sharko A. A., Smetankin S. A., Stepanchikov D. M., Yurenin K. Yu. Application of acoustic emission and strain gaugez measurements to processes of diagnostics of strain hardening of epoxy matrix composites. *Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing* 2019. №3. p. 49–54.
9. Korniejenko K., Kejzlar P., Louda P. The Influence of the Material Structure on the Mechanical Properties of Geopolymer Composites Reinforced with Short Fibers Obtained with Additive Technologies. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, 23 (4), art. no. 2023.
10. Korniejenko K., Łach M., Chou S.-Y., Lin W.-T., Cheng A., Hebdowska-Krupa M., Gadek S., Mikula J. Mechanical properties of short fiber-reinforced geopolymers made by casted and 3D printing methods: A comparative study. *Materials*, 2020, 13 (3), art. no. 57.
11. Akono A. T., Koric S., Kriven W. M. Influence of pore structure on the strength behavior of particle- and fiber-reinforced metakaolin-based geopolymer composites. *Cement and Concrete Composites*, 2019, 104, art. no. 103361.
12. Akmal J., Badaruddin M., Ismoyo M.K., Yuwono S.D. Optimisation of matrix compositions of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, Caolin, and CaO on the mechanical properties of a geopolymer composite with short carbon fiber. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 602 (1), art. no. 012079.
13. Frenette C. D., Beauregard R., Salenikovich A., Derome D. Multi-criteria evaluation of the compositions of walls of light frame wood construction [Évaluation multi-critère descompositions de murs à ossature légère en bois] *Proceedings, Annual Conference – Canadian Society for Civil Engineering*, 2, pp. 909–918.
14. Tang Y., Shu J., Li W., He Y., Yang Y., Sun P. Quantitative Risk Evaluation Model of the Multilevel Complex Structure Hierarchical System in the PetrochemicalIndustry. *Mathematical Problems in Engineering*, 2019, art. no. 9328634.
15. Liu G., Han D., Jia Y., Zhao Y. Asphalt mixture skeleton main force chains composition criteria and characteristics evaluation based on discreteelement methods. *Construction and Building Materials*, 2022, 323, art. no. 126313.
16. Kussmaul R., Zogg M., Ermanni P. An optimality criteria-based algorithm for efficient design optimisation of laminated composites using concurrentresizing and scaling. *Structural and Multidisciplinary Optimisation*, 2018, 58 (2), pp. 735–750.
17. Boldyrev A.V., Kozlov D.M., Pavelchuk M.V. Evaluation of Anisogrid Composite Lattice Structures Weight Effectiveness using the Load-carrying Factor. *Procedia Engineering*, 2017, 185, pp. 153–159.
18. Pop C.B., Chifu V.R., Salomie I., Baico R.B., Dinsoreanu M., Copil G. A hybrid firefly-inspired approach for optimal semantic web service composition *Scalable Computing*, 2011, 12 (3), pp. 363–369.
19. Sharko A., Louda P., Nguyen V., Buczkowska K., Stepanchikov D., Ercoli R., Le V. Multicriteria Assessment for Calculating the Optimal Content of Calcium-Rich Fly Ash in Metakaolin-Based Geopolymers. *Ceramics*, 2023, 6(1), 525–537.
20. Le V. S., Sharko A., Sharko O. Stepanchikov D., Buczkowska K., Louda P. Multicriteria optimization of the composition, thermodynamic and strength properties of fly-ash as an additive in metakaolin-based geopolymer composites. *Sci Rep* 14, 10434 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-61123-1>

## REFERENCES

1. Gorokhov, M. S. (2014). Influence of dispersion reinforcement parameters on the crack resistance of ship structures made of fibre-reinforced concrete. *Bulletin of the State University of Sea and River Fleet named after Adm. S.O. Makarova*, No. 1(23), 68–73.

2. Shekhorkina, S. E., Matyushenko, I. M., Savytskyi, M. V. (2013). Study of the durability of reinforced concrete pontoons operated on water bodies of Ukraine. *Bulletin of the Pidniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture*. №1, 2 P. 64–49.
3. Hololobov, B. D., Parashenko, A. O., Holozubov, T. V. (2015). The use of dispersion-reinforced fiber concrete in the manufacture of the manhole cover of the inspection well *Collection of scientific works DonNABA, issue.1, p. 32–36.*
4. Noskov, A. S., Filipov, V. P., Belyakov, V. A. (2005). The use of modern chemical admixtures in designing the composition of structural polystyrene concrete. *Concrete and reinforced concrete in Ukraine, No. 4(26), p. 13–21.*
5. Almenov, Kh., Khurramov, A. Ch., Sofarov, S. S., Mirzaolimov, I. F. (2022). Comparative analysis of the methodology for calculating the crack opening in reinforced concrete elements with radial fibre reinforcement. *Central Asian Research Journal for Interdisciplinary Studies Vol.2 (3), 449–455.*
6. Prikhodko, A. P., Shpilko, N. V., Ulchenko, T. V., Berehiy. Y. G. (2012). High-strength self-compacting concrete. *Bulletin of the Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, No. 2/3, pp. 87–94.*
7. Sakhoshko, E. V., Zaychenko, N. M. (2019). Self-compacting concrete in modern monolithic housing construction. *Bulletin of the Donbas State Academy of Civil Engineering and Architecture. Makiivka, 2009, issue 1(75), pp. 112-116.* V.L. Aleksenko, A.A. Sharko, A.V. Sharko, D.M. Stepanchikov, K.Yu. Yurenin Identification by AE method of structural features of deformation mechanisms at bending. *Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing. – №1. – p. 32–39.*
8. Aleksenko, V. L., Sharko, A. A., Smetankin, S. A., Stepanchikov, D. M., Yurenin, K. Yu. (2019). Application of acoustic emission and strain gauge measurements to processes of diagnostics of strain hardening of epoxy matrix composites. *Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing. №3. p. 49–54.*
9. Kornijejenko, K., Kejzlar, P., Louda, P. (2022). The Influence of the Material Structure on the Mechanical Properties of Geopolymer Composites Reinforced with Short Fibers Obtained with Additive Technologies. *International Journal of Molecular Sciences, 23 (4), art. no. 2023.*
10. Kornijejenko, K., Łach, M., Chou, S.-Y., Lin, W.-T., Cheng, A., Hebdowska-Krupa, M., Gadek, S., Mikula, J. (2020). Mechanical properties of short fiber-reinforced geopolymers made by casted and 3D printing methods: A comparative study. *Materials, 13 (3), art. no. 57.*
11. Akono, A. T., Koric, S., Kriven, W. M. (2019). Influence of pore structure on the strength behavior of particle- and fiber-reinforced metakaolin-based geopolymer composites. *Cement and Concrete Composites, 104, art. no. 103361.*
12. Akmal, J., Badaruddin, M., Ismoyo, M. K., Yuwono, S. D. (2019). Optimisation of matrix compositions of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, Caolin, and CaO on the mechanical properties of a geopolymer composite with short carbon fiber. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 602 (1), art. no. 012079.*
13. Frenette, C. D., Beauregard, R., Salenikovich, A., Derome, D. Multi-criteria evaluation of the compositions of walls of light frame wood construction [Évaluation multi-critère des compositions de murs à ossature légère en bois] *Proceedings, Annual Conference – Canadian Society for Civil Engineering, 2, pp. 909–918.*
14. Tang, Y., Shu, J., Li, W., He, Y., Yang, Y., Sun, P. (2019). Quantitative Risk Evaluation Model of the Multilevel Complex Structure Hierarchical System in the Petrochemical Industry. *Mathematical Problems in Engineering, art. no. 9328634.*
15. Liu, G., Han, D., Jia, Y., Zhao, Y. (2022). Asphalt mixture skeleton main force chains composition criteria and characteristics evaluation based on discrete element methods. *Construction and Building Materials, 323, art. no. 126313.*
16. Kussmaul, R., Zogg, M., Ermanni, P. (2018). An optimality criteria-based algorithm for efficient design optimisation of laminated composites using concurrent resizing and scaling. *Structural and Multidisciplinary Optimisation, 58 (2), pp. 735–750.*

17. Boldyrev, A. V., Kozlov, D. M., Pavelchuk, M. V. (2017). Evaluation of Anisogrid Composite Lattice Structures Weight Effectiveness using the Load-carrying Factor. *Procedia Engineering*, 185, pp. 153–159.

18. Pop, C. B., Chifu, V. R., Salomie, I., Baico, R. B., Dinsoreanu, M., Copil, G. (2011). A hybrid firefly-inspired approach for optimal semantic web service composition *Scalable Computing*, 12 (3), pp. 363–369.

19. Sharko, A., Louda, P., Nguyen, V., Buczkowska, K., Stepanchikov, D., Ercoli, R., Le, V. (2023). Multicriteria Assessment for Calculating the Optimal Content of Calcium-Rich Fly Ash in Metakaolin-Based Geopolymers. *Ceramics*, 6(1), 525–537.

20. Le, V. S., Sharko, A., Sharko, O., Stepanchikov, D., Buczkowska, K., Louda, P. (2024). Multicriteria optimization of the composition, thermodynamic and strength properties of fly-ash as an additive in metakaolin-based geopolymer composites. *Sci Rep* 14, 10434. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-61123-1>.

**Sharko O., Stepanchikov D., Sharko A., Yanenko A., Movchan P. APPLICATION OF MULTICRITERIA ANALYSIS IN THE STUDY OF THERMODYNAMIC PROCESSES IN SHIP REPAIR AND TRANSPORT INFRASTRUCTURE**

*The subject of research is a system of multi-criteria analysis in the study of thermodynamic processes in ship repair and transport infrastructure in real time. The topic of research is the development of methodology for assessing the composition of the concrete mixture during hardening process. The aim of the work is modeling of physical and technological parameters of concrete mixtures using multi-criteria optimization. The relevance of the research lies in the fact that at the manufacturing stage, depending on the phases of concrete hardening, the parameters of the heat capacity and thermal conductivity of the concrete mixture change. The uniformity of distribution of temperature parameters in the concrete volume also changes. The resulting stresses create microdefects that reduce the strength properties of the concrete mixture. Depending on their composition, strength properties depend on the choice of optimal thermodynamic processes for obtaining concrete mixtures: bending and compressive strength limits, impact strength and density of the material. The novelty of the work lies in the fact that a multi-criteria analysis algorithm has been developed for the study of thermodynamic processes in ship repair. The optimal composition of structural elements of the mixtures for the given technology of their production was determined. The results of the research are the computational basis of the calculations became the digitization of the technology of research and analysis of physical and mechanical properties of concrete mixtures. The field of application is the study of thermodynamic processes used in ship repair and transport infrastructure. The practical significance of the work is that the conducted experiments and calculations showed that the use of research results in combination with optimization criteria is the basis for increasing the reliability of evaluating the parameters of thermodynamic processes and optimizing the strength properties of the concrete mixture, determining the composition and structure of materials for changes in their production technologies. The advantage of the methodology is its scalability and adaptability to workloads.*

**Key words:** multi-criteria analysis; composition; optimisation; thermodynamic processes; ship repair; transport infrastructure.

© Шарко О., Степанчиков Д., Шарко А., Яненко А., Мовчан П.

Статтю прийнято до редакції 06.06.2024