

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.04:[692.23:699.8]

Н. О. ДАНКЕВИЧ^{1*}, В. І. АНІН², К. О. ЖУКОВСЬКИЙ³

^{1*} Кафедра «Промислове та цивільне будівництво», Запорізький національний університет, пр. Соборний, 226, Запоріжжя, Україна, 69006, тел. +38 (066) 482 42 78, ел. пошта DankevichNatali28@gmail.com, ORCID 0000-0002-7146-9303

² Кафедра «Промислове та цивільне будівництво», Запорізький національний університет, пр. Соборний, 226, Запоріжжя, Україна, 69006, тел. +38 (066) 482 42 78, ел. пошта yurabella1@gmail.com, ORCID 0000-0002-2936-2262

³ Кафедра «Промислове та цивільне будівництво», Запорізький національний університет, пр. Соборний, 226, Запоріжжя, Україна, 69006, тел. +38 (098) 828 54 23, ел. пошта zhukovskiy91@icoud.com, ORCID 0009-0005-0138-9841

МЕТОДОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПИТАНЬ ПРОЄКТУВАННЯ ФАСАДНИХ СИСТЕМ З УРАХУВАННЯМ ВИМОГ СУЧАСНИХ ТЕНДЕНЦІЙ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ БУДІВЕЛЬ

Мета. Дослідження існуючих підходів до оцінки енергоефективності зовнішніх огорожувальних конструкцій та техніко-економічне обґрунтування вибору конструктивних рішень фасадних систем для опорядження зовнішніх огорожувальних конструкцій ПС «Юність» в м. Запоріжжя на засадах варіативного проектування, що дозволяє знизити тепловитрати на опалення та енергоємність експлуатації будівлі. **Методика.** Ключова роль дослідження покладена на генерування знань і вмій практичного застосування сучасного проектно-технологічного підходу до вирішення питань вибору фасадної системи при проектуванні будівель для отримання максимальної енергоефективності та відокремлення стилю будівлі в умовах міської забудови. **Результати.** В роботі розглянуто методи визначення показників експлуатаційної ефективності фасадів будівель та споруд, а також проаналізовано додаткову інформацію з вітчизняних та іноземних джерел, використано інформацію з типових проєктів що раніше реалізовані у м. Запоріжжя. В процесі роботи були розроблені ефективні організаційно-технологічні рішення фасадних робіт на базі експериментально-статистичного моделювання. **Наукова новизна.** Комплексний розгляд зведених витрат на виконання зовнішніх опоряджувальних робіт, конструктивних особливостей фасадної системи з характером дії атмосферних чинників з урахуванням архітектурних рішень реального об'єкта будівництва в м. Запоріжжя. Аналіз результатів дослідження показав, що високої ефективності фасадних робіт при низьких витратах можна досягти тільки при виборі та проектуванні інженерних рішень, які об'єднують конструкцію фасадної системи та характеристики навколишнього середовища будівельного об'єкта. **Практична значимість.** Рекомендації щодо врахування кліматичних та екологічних характеристик м. Запоріжжя, в якому розташований ПС «Юність», їх впливу на експлуатаційну ефективність оздоблювальних елементів фасаду.

Ключові слова: зовнішні огорожувальні конструкції, фасадні системи, енергоефективність, нормативна база, порівняльний аналіз, техніко-економічне обґрунтування

Вступ

На сьогодні у будівництві в результаті появи нових конструктивних схем фасадних систем, вдосконалення технологічних процесів відбулася ґрунтовна переоцінка підходів до вибору фасадних матеріалів, що застосовуються при підвищенні показників енергоефективності будівель. Архітектурна привабливість міст, незалежно від того це новий проєкт, чи це реконструкція вже існуючої, в першу чергу визначається

якістю фасадних конструкцій і їх окремим стилем та особливістю. Часи звичних типових будинків і фасадів вже стали історією. Виникла необхідність створення об'єктів різноманітних за своїм дизайном, ергономічністю, довговічністю і надійністю. Підвищення якості конструктивних рішень фасадних систем в подальшому призводить до суттєвого скорочення експлуатаційних витрат.

Оскільки зазначені витрати з обслуговування фасадів безпосередньо залежать від конс-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

труктивного рішення обраного типу системи, якості фасадних матеріалів та виконання будівельно-монтажних робіт. Потреба у скороченні витрат і мінімізації ризиків в сучасному будівництві стоїть на першому місці, таким чином оптимізація всього процесу проектування фасадів визначає актуальність дослідження.

Мета

В умовах нестійкого ринку, коли підвищення ціни постачальників енергоносіїв пропорційно впливає на підвищення ціни енергоресурсів для споживачів, головною, задачею підвищення показників енергоефективності та зниження споживання енергоресурсів у будівлях актуалізується все частіше і набуває особливої уваги через нагальну потребу економії коштів на їх утримання. Тому при проектуванні тієї чи іншої фасадної системи (ФС), необхідно пам'ятати, що даний захід має бути ефективним та економічно вигідним (Nguyen, et al., 2013, Жуковський, 2020).

Методика

Нагальною проблемою при розробці проекту ФС будівель і споруд з великим об'ємом виконання будівельно-монтажних робіт є управління цим проектом. У свою чергу управління проектом є здобуток попередньо сформульованих цілей з наявними обмеженнями та цілями, що дає змогу своєчасно реагувати на можливі ризики в процесі проектування та виконання робіт. Варто відзначити, що основним фактором успіху управління проектом є наявність чіткого попередньо розробленого плану, зменшення ризиків і відступів від плану, ефективного коригування змін.

Як зазначає (Менейлюк, et al., 2016; Борисенко, et al., 2013), структура продукту проекту ФС – схема, що показує структуру виробленого за проектом фасаду та організація зав'язків і відносин між її елементами, а саме:

- 1) попередній аналіз ринку ФС та фасадних матеріалів;
- 2) вибір типу ФС;
- 3) розробка концепції технології будівельно-монтажних робіт з влаштування обраного фасаду;
- 4) проведення числового експерименту;
- 5) розгляд основних областей організацій-

но-технологічного планування та управління проектування ФС на основі отриманих від дослідження результатів;

- б) отримання загальних висновків по роботі.

Результати

Науково-методичне обґрунтування проведених досліджень були розглянуті в кваліфікаційній роботі магістра на тему «Обґрунтування вибору конструктивних рішень фасадної системи Saqay Cotta при будівництві палацу спорту «Юність» в місті Запоріжжя (Жуковський, 2020). Під час вирішення інженерно-технологічних питань проектування ФС одним із важливіших і відповідальних рішень є оцінка термінів експлуатаційної ефективності конструктивної системи фасадів. За такого оцінювання можливо проектувати системи із визначеними характеристиками фізико-механічних властивостей за умови мінімізації витрат матеріальних і енергетичних ресурсів.

Визначення найбільш суттєвого показника якісних характеристик фасадної системи, яким є опір теплопередачі, це вирішальне питання енергоефективності зовнішніх огорожень будівлі. У розрізі аспектів проектування ФС «мокрого» типу маємо композиційну систему з тонкими штукатурними шарами, що складається з комплексу елементів, кожний з яких виконує певну функцію, і відповідно до свого призначення кожний елемент системи повинен мати певні фізико-механічні і теплотехнічні характеристики. У комплексі елементи теплоізоляції мають забезпечувати максимальну довговічність ФС та її надійну безаварійну роботу в період експлуатації (Бабій et al., 2019).

Конструкція штукатурного фасаду впродовж усього терміну експлуатації піддається значним природно-кліматичним навантаженням. Дія знакозмінної температури при різних показниках вологості й інші несприятливі поєднання кліматичних умов можуть призвести до порушення роботи системи в цілому, її пошкодження або навіть до часткового чи повного руйнування. Із цієї причини кожна система теплоізоляції з тонким штукатурним шаром повинна обов'язково випробовуватися на стійкість до вищезазначених дій.

Згідно (Чернявський, 2010), забезпечення фізико-механічних показників фасадної теплоі-

золяції найбільш важливою частиною ФС є армований базовий штукатурний шар із спеціального цементно-полімерного розчину, що наноситься поверх теплоізоляційного матеріалу й армується корозійностійкими сітками. Внаслідок цього, він має ключову роль у ідентифікації основних фізико-механічних властивостей системи в цілому.

Базовий шар – основний захисний шар для теплоізоляційного матеріалу, який сприймає і перерозподіляє всі зовнішні навантаження і дії (механічне ударне навантаження, температурні деформації, усадка тощо); забезпечує адгезію з утеплювачем пінополістирол (ППС), мінеральна вата (МВ), високу еластичність і ударну міцність, низьку усадку, високу паропроникність та низьке водопоглинання. У разі використання у базовому штукатурному шарі матеріалів, що мають властивості, які не відповідають потрібним, а також у випадку порушення технології нанесення складів вірогідність пошкодження ФС вже в початковий період експлуатації зростає в 1,5 рази.

Виходячи з результатів досліджень (Чебишев, 2013; Jin, 2012; Pantazis, & Gerber, 2018; Бабій et al., 2019; Hensen, J., et al., 2002), були визначені основні показники для клейових, базових і декоративно-захисних складів, які забезпечують надійну експлуатацію штукатурних фасадів та використовуються, у тому числі, й при оцінюванні технічної придатності фасадних матеріалів (таблиця 1, 2, 3).

Таблиця 1

Технічні вимоги до клейового шару штукатурного фасаду

Найменування показника	Нормативне значення
Час використання розчинної суміші, хв	120
Відкритий час розчинної суміші, хв	20
Час коригування положення наклеєного утеплювача, хв	10
Міцність зчеплення розчину з основою після: витримування у повітряно-сухому стані, МПа	0,5
поперемінного замороження-відтаювання (75 циклів), МПа	0,5

Таблиця 2

Технічні вимоги до захисного шару штукатурного фасаду

Найменування показника	Нормативне значення
Час використання розчинної суміші, хв	60
Міцність розчину на стиск, МПа	10
Коефіцієнт водопоглинення розчину, % за масою	0,5
Усадка розчину, мм/м	1,5
Міцність зчеплення розчину з утеплювачем після: витримування у повітряно-сухому стані, МПа	0,08/0,015
поперемінного замороження-відтаювання (75 циклів), МПа	0,08/0,015
температурного впливу, МПа	0,08/0,015
Паропроникність розчину, мг/м год Па:	
по органічному в'язучому	0,03
по синтетичному в'язучому	0,04

Таблиця 3

Технічні вимоги до декоративного опоряджувального шару штукатурного фасаду

Найменування показника	Нормативне значення	
	Полімерцементний	Полімерний
Час використання розчинної суміші, хв	60	30
Міцність зчеплення розчину з утеплювачем після витримування у повітряно-сухому стані, МПа	0,5	0,5
Морозостійкість розчину, цикли:		
цоколь	75	75
стіни	50	50
Коефіцієнт водопоглинення розчину, % за масою	0,5	0,2
Паропроникність розчину, мг/м·год·Па	0,04	0,03

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Довговічність та експлуатаційна надійність конструкцій ФС «мокрого» типу зазвичай підтверджується серійними випробуваннями.

Для випробування фізико-механічних властивостей ФС на кліматичні дії і з метою прогнозування їх експлуатаційної надійності та довговічності європейським стандартом ЕТАС 004 ЕОТА передбачено метод випробування повнорозмірних зразків ФС.

Для проведення випробувань використовується спеціальний стенд, на якому вмонтовується зразок системи площею не менше 6 м², і мобільна кліматична камера, в котрій відтворюються різні режими температурної вологості (Менейлюк, et al., 2008; Менейлюк, et al., 2016).

Згідно програми кліматичних випробувань, передбачених цим стандартом, заплановано наступні циклічні дії на фасадну систему «скріпленого» оздоблення:

1) 80 літніх циклів тривалістю 6 годин, де 2 год. підтримується температура 70 °С і вологість 10 %; 1 год імітується дощ при температурі 15 °С та 2 год конструкція витримується при температурі 20 °С;

2) 5 зимових циклів тривалістю 24 год, де 8 год підтримується температура 50 °С та вологість 10 %; 16 год конструкція витримується при температурі -20 °С;

3) між циклами конструкція витримується 48 годин без будь-яких температурно-вологісних впливів при температурі 23 °С і вологості 50 %.

Отже, кліматична камера забезпечує моделювання різноманітних атмосферних впливів на ФС будівлі або споруди. Відповідно до цих досліджень довговічність сертифікованої ФС складає не менше 25 років за умови, що вона централізовано поставляється, правильно спроектована, змонтована і експлуатується до діючих будівельних стандартів.

Як зазначає (Борисенко et al., 2013; Чернявський, 2010), такий цикл випробувань відображає кліматичні характеристики Західної і Центральної Європи. Метод визначення стійкості ФС до кліматичних впливів згідно чинних будівельних норм та стандартів України полягає в тому, що конструкцію штукатурного фасаду піддають процесу який контролюється й повторюється під впливом кліматичних умов, тим самим створюють моделювання експлуатаційних умов фасадної системи та визначають

зміни її експлуатаційних характеристик. Метод випробувань базується на циклічному чергуванні різних режимів кліматичних дій на ФС: дощування – заморожування – відтавання – нагрівання. Кількість випробувань становить не менше ніж 60, однак, для реальних конструкцій приймаються показники 75, 100 і 150 циклів. Ця кількість досліджень умовно відповідає довговічності випробовуваної конструкції в роках – 10, 15 і 25 років (при позитивному результаті випробувань). Через кожні десять циклів випробувань фіксують зміни опоряджувального шару ФС, наявність або відсутність пошкодження штукатурного шару (відшарування, тріщин, сколів, зміни кольору тощо), які утворилися внаслідок моделювання кліматичного впливу. Виходячи з вищезазначеного, штукатурні фасади повинні тривалий період зберігати свої первинні тепло- й гідрозахисні властивості при експлуатаційних діях на рівні, передбаченому проектом ФС. Більшість інженерів-проектувальників визначають безремонтний термін служби для своїх систем не більше 40 років, але за реальних умов спостерігаються ознаки відмов ФС вже через декілька років (Чернявський, 2010).

В теплоізоляційних НВФ експлуатаційну ефективність визначає матеріал є МВ. Згідно даних (Kumbhar, Gupta, & Desai, 2013; Менейлюк, et al., 2016; Циганенко, & Жолобка, 2015), отриманими експериментально-теоретичним шляхом, можна зробити наступні висновки що теплопровідність утеплювача різної безпосереднє впливають як кліматичні фактори так і технологічні. Результати досліджень температури повітряного прошарку систем «сухого» типу, отримані використовуючи данні тепловізора, що, дозволило встановити опір теплопередачі утеплювача, що визначається за формулою:

$$R_{ут} = R_{пр}^0 - R_{констр}^{np} - R_{обл}^{np}, \quad (1)$$

де $R_{констр}^{np}$, $R_{обл}^{np}$ зведений опір теплопередачі частин конструкції ФС від внутрішньої поверхні до повітряного прошарку та від повітряного прошарку до зовнішньої поверхні конструкції відповідно, м²·°С/Вт; $R_{пр}^0$ зведений опір теплопередачі всієї конструкції, м²·°С/Вт.

Аналіз порівняння результатів, отриманих авторами у лабораторних умовах експериментально-теоретичним шляхом, із результатами згідно з розрахунками за формулою (1) дає можливість визначити величину розбіжності ре-

зультатів, зв допомогою якої можна розрахувати зміну в часі величини опору теплопередачі НВФ. Таким чином, у загальному вигляді формула для визначення експлуатаційної ефективності має вигляд:

$$E_{\text{екс}} = n_e \cdot k_{\text{зб}} \cdot k_{\text{у.е.}}, \quad (2)$$

де n_e – розрахунковий показник опору теплопередачі ФС, отриманий на основі дійсних досліджень; $k_{\text{зб}}$ – коефіцієнт збіжності (відношення розрахункових до результатів, отриманих після визначеного терміну експлуатації НВФ в умовах які відповідають середовищу його використання); $k_{\text{у.е.}}$ – коефіцієнт умов експлуатації запроєктованої системи, який відображає експлуатаційні умови.

Дослідження (Mohaneu, & Soni, 2018; Мейнелюк, et al., 2016; Бабій, et al., 2019) за допомогою тепловізора будівель із НВФ, з мінераловатними утеплювачами щільністю 40, 80, 150 кг/м³, які експлуатувалися протягом понад 5 років, показали наступні результати в процесі розрахунку. Було встановлено, що у разі використання як утеплювача МВ із щільністю 40 кг/м³ у НВФ опір теплопередачі через 5 років склав 0,8 м²·°C/Вт, що порівнюється з 4,2 умовними роками. Таким чином, коефіцієнт збіжності $k_{\text{зб}}$ склав 1,19. Для МВ щільністю 80 кг/м³ $k_{\text{зб}} = 0,9$, а для щільності 150 кг/м³ – $k_{\text{зб}} = 0,95$.

Для варіативного аналізу практичного використання результатів досліджень для об'єкту ПС «Юність» в м. Запоріжжя були прийняті системи НВФ із декількома конструктивно-технологічними рішеннями, що прийняті згідно ДСТУ Б.В-2.6-33 (ДБН В.2.6-33:2018, (2018)):

– стіна з газобетонного блоку товщиною 300 мм, щільністю 500 кг/м³ і теплопровідністю 0,25 Вт/м·°C;

– шар теплоізоляції для II температурної зони (м. Запоріжжя) – одношарова теплоізоляція товщиною 50 мм. Для порівняння трьох систем були обрані наступні варіанти щільності МВ (відповідно 40 кг/м³, 80 кг/м³ та 150 кг/м³, із середньою теплопровідністю 0,042 Вт/м·°C);

– облицювальні панелі з керамічної плитки товщиною 6 мм, теплопровідністю 0,96 Вт/м·°C.

Разом з тим, встановлено, що дана система характеризується підвищеною пожежонебезпечкою, що надає можливість використовувати утеплювач різної щільності без влаштування вітрозахисної мембрани.

Аналіз результатів показав, що період ефективної експлуатації НВФ в більшості випадків завжди залежить від щільності утеплювача МВ. Також аналіз показав, що від час механічного руйнування (дії вітру), змінюється і опір теплопередачі МВ. В таблиці 4 відображено результати розрахунку опору теплопередачі ФС різної щільності, згідно з розрахунковою схемою, наведеною вище. Розрахунки проведені відповідно до зазначеної методики оцінювання експлуатаційної ефективності (Бабій, et al., 2019)

Таблиця 4

Результати досліджень технологічних систем НВФ при експлуатації через задані проміжки часу для II температурної зони

Щільність утеплювача, кг/м ³	R _{поч} , м ² ·К/Вт	R _{рік} , м ² ·К/Вт						
		1 рік	3 роки	5 років	7 років	8 років	9 років	27 років
40	3,395	3,187	2,981	2,528	-	-	-	-
80	3,498	3,321	3,142	3,002	2,900	2,836	2,783	-
150	3,470	3,379	3,248	3,163	3,130	3,047	3,026	2,790

Аналіз даних таблиці 4 показує, що використання МВ щільністю 40 кг/м³ без вітрозахисної мембрани недоцільне. На думку авторів (Мейнелюк, et al., 2008; Скокова, 2015), це викликано тим, як показали результати досліджень, що через п'ять років показник опору теплопередачі стає нижчим за нормативний. Тому в подальшому слід виконувати аналіз

економічних показників тільки для систем з утеплювачами щільністю 80 і 150 кг/м³. Слід також зазначити, що в практиці проектування ФС для розрахунків опору теплопередачі НВФ необхідно керуватися певними правилами, зокрема виходячи з наведених вище досліджень щодо зменшення товщини матеріалу теплоізоляції: внаслідок емісії волокон із поверхні МВ

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

відповідно зменшується й опір теплопередачі ФС в цілому.

Залежно від цього, вихідний розрахунковий показник опору теплопередачі конструкції ФС, відповідно до встановленого дослідженнями правила, через 25 років постійного впливу сонячної радіації, опадів, коливань температури повітря, може збільшитися в середньому на 23% від нормативної величини. Але при тих же самих умовах експлуатації утеплювач (МВ) із щільністю 150 кг/м³ має початковий нормативний показник опору теплопередачі. Як зазначено у дослідженні (Бабій, 2019; Чернявський, 2010), навіть за умов дії вітрового навантаження фізико-механічні властивості утеплювача не змінюються. Отже для збільшення пожежної безпеки ФС і зменшення ризиків порушення етапів технологічного процесу за умов використання такої щільності утеплювача вітрозахисна мембрана (часто, яка є горючим матеріалом класу Г2) в системі НВФ не потрібна. У разі використання МВ із щільністю 80 кг/м³ після 25 років експлуатації дана система теплоізоляції не відповідає нормативу. Нормативне значення показника опору теплопередачі зберігається на протязі не більш чим 9 років експлуатації ФС. Унаслідок, для таких систем НВФ можна рекомендувати улаштування покриття для захисту утеплювача фасаду від поривів вітру, але тільки з негорючих матеріалів (клас горючості НГ). Згідно (Радкевич, Анін, Радченко, & Шуваєв, 2021; Яким, & Ужегова, 2011), під час горіння мембрани температура в повітряному прошарку НВФ піднімається понад 700 °С. У свою чергу, це може спричинити випаровування фенолоформальдегідних смол і займання захисно-декоративного екрану, наприклад, який можна виконати з композитних панелей з низьким класом горючості Г3-Г4.

Таким чином можемо констатувати, що конструктивне рішення ФС, якісне виконання системи теплоізоляції відіграє значну роль у її надійній експлуатації та суттєво впливає на довговічність конструкції фасаду загалом. Значний вплив на показники якості елементів ФС має і правильно побудована програма моніторингу фасадних конструкцій в процесі експлуатації будівлі або споруди. Тому необхідність розроблення нормативної й експериментально-технічної бази, а також проведення максимально широкого кола експериментальних досліджень в розрізі проектування ФС не викликають сумнівів. Крім того, без створення критеріїв оцінювання експлуатаційних характеристик

та фізико-механічних властивостей фасадних конструкцій для визначення їх довговічності та експлуатаційної надійності неможливе і вирішення питання енергоефективності зовнішніх огорожувальних конструкцій в цілому.

Наукова новизна та практична значимість

Доведено, що проблема підвищення енергоефективності потрібно розглядати як комплексний проектно-технологічний процес. Високі показники енергоефективності можна досягти тільки при виборі та проектуванні інженерних рішень, які об'єднують конструкцію фасадної системи та характеристики навколишнього середовища будівельного об'єкта. Період ефективної експлуатації НВФ в більшості випадків завжди залежить від щільності утеплювача МВ, що суттєво впливає на довговічність конструкції фасаду загалом.

Висновки

На сьогодні енергозбереження та енергоефективність є одним з пріоритетних питань пов'язаних з економічним розвитком нашої держави. Обґрунтування вибору конструктивних рішень ФС, якісне виконання системи теплоізоляції відіграє значну роль у її надійній експлуатації та суттєво впливає на довговічність конструкції фасаду загалом. Значний вплив на показники якості елементів ФС має і правильно побудована програма моніторингу фасадних конструкцій в процесі експлуатації будівлі або споруди. Тому необхідність розроблення нормативної й експериментально-технічної бази, а також проведення максимально широкого кола експериментальних досліджень в розрізі проектування ФС не викликають сумнівів.

Крім того, без створення критеріїв оцінювання експлуатаційних характеристик та фізико-механічних властивостей фасадних конструкцій для визначення їх довговічності та експлуатаційної надійності неможливе і вирішення питання енергоефективності зовнішніх огорожувальних конструкцій в цілому.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Hensen, J., et al. (2002). Modeling and simulation of a double-skin facade system. *ASHRAE transactions*, 2, 108, 1251-1259.
- Jin Q., et al. (2012). Towards productivity indicators for performance-based façade design in commercial buildings. *Building and Environment*, 57, 271-281.

- Kumbhar, S., Gupta, A., & Desai, D. (2013). Recycling and reuse of construction and demolition waste for sustainable development. *OIDA International Journal of Sustainable Development*, 6(7), 83-92.
- Mohaneey, P., & Soni, E. G. (2018). Aluminium composite panel as a facade material. *International journals of engineering trends and technology (IJETT)*, 55(2), 75-80.
- Nguyen, Q. T., et al. (2013). Composite materials for next generation building facade systems. *Civil Engineering and Architecture*, 3, 88-95.
- Pantazis, E., & Gerber, D. A. (2018). Framework for generating and evaluating facade designs using a multi-agent system approach. *International Journal of Architectural Computing*, 16(4), 248-270.
- Бабій, І. М., et al. (2019). Дослідження експлуатаційної ефективності систем зовнішньої теплоізоляції фасадів. *Вісник ПДАБА*, 4, 10-15.
- Борисенко, О. Б., et al. (2013). Експериментальні дослідження температурних деформацій теплоізоляційних матеріалів фасадних систем з штукатурним шаром. *Ресурсоєкономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*, 25, 21-26.
- ДБН В.2.6-33:2018 (2018). *Конструкції зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією*. Київ: Державні будівельні норми.
- Жуковський, К. О. (2020) *Обґрунтування вибору конструктивних рішень фасадної системи Sagar Cotta при будівництві палацу спорту «Юність» в місті Запоріжжя*: кваліфікаційна робота магістра. Запоріжжя.
- Менейлюк, А. И., et al. (2008). *Современные фасадные системы*. Киев: «Освіта України».
- N. O. DANKEVYCH^{1*}, V. I. ANIN², K. O. ZHUKOVSKIY³

^{1*} Department of Industrial and Civil Engineering, Zaporizhzhia National University, 226 Sobornyi ave, Zaporizhzhia, Ukraine, 69006, tel. +38 (098) 272 90 77, e-mail DankevichNatali28@gmail.com, ORCID 0000-0002-7146-9303

² Department of Industrial and Civil Engineering, Zaporizhzhia National University, 226 Sobornyi ave, Zaporizhzhia, Ukraine, 69006, tel. +38 (098) 272 90 77, e-mail yurabella1@gmail.com, ORCID 0000-0002-2936-2262

³ Department of Industrial and Civil Engineering, Zaporizhzhia National University, 226 Sobornyi ave, Zaporizhzhia, Ukraine, 69006, tel. +38 (098) 828 54 23, e-mail zhukovskiy91@icoud.com, ORCID 0009-0005-0138-9841

METHODOLOGICAL ASPECTS OF ENGINEERING AND TECHNOLOGICAL ISSUES OF FACADE SYSTEM DESIGN TAKING INTO ACCOUNT THE REQUIREMENTS OF CURRENT BUILDING ENERGY EFFICIENCY TRENDS

Purpose. The study of existing approaches to the assessment of the energy efficiency of external enclosing structures and the technical and economic justification of the choice of structural solutions of facade systems for equipping the external enclosing structures of the «Yunist» substation in the city of Zaporizhzhia on the basis of variable design, which allows to reduce heat costs for heating and the energy consumption of building operation. **Methodology.** An important role in the research is played by the formation of knowledge and skills in the use of a modern design and technological approach to solving the problems of choosing a facade system in the design of buildings to obtain maximum energy efficiency and separation of the style of the building in the conditions of urban development. **Findings.** The work examines the methods of determining the indicators of operational efficiency of facades of buildings and structures, as well as studies additional information from foreign and domestic sources, analyzes typical projects that have already been implemented on the territory of the city of Zaporizhzhia. In the

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

course of the work, effective organizational and technological solutions for facade works were developed on the basis of experimental and statistical modeling. **Originality.** A comprehensive review of aggregated costs for the execution of external finishing works, structural features of the facade system with the nature of the action of atmospheric factors, taking into account the architectural solutions of the real construction site in the city of Zaporizhzhia. The analysis of the research results showed that high efficiency of facade works at low costs can be achieved only when choosing and designing engineering solutions that combine the design of the facade system and the environmental characteristics of the building object. **Practical value.** Recommendations regarding taking into account the climatic and ecological characteristics of the city of Zaporizhzhia, where the «Yunist» station is located, their impact on the operational efficiency of the decorative elements of the facade.

Keywords: external enclosing structures, facade systems, energy efficiency, regulatory framework, comparative analysis, technical and economic justification

REFERENCES

- Hensen, J., et al. (2002). Modeling and simulation of a double-skin facade system. *ASHRAE transactions*, 2, 108, 1251-1259. (in English)
- Jin Q., et al. (2012). Towards productivity indicators for performance-based façade design in commercial buildings. *Building and Environment*, 57, 271-281. (in English)
- Kumbhar, S., Gupta, A., & Desai, D. (2013). Recycling and reuse of construction and demolition waste for sustainable development. *OIDA International Journal of Sustainable Development*, 6(7), 83-92. (in English)
- Mohaney, P., & Soni, E. G. (2018). Aluminium composite panel as a facade material. *International journals of engineering trends and technology (IJETT)*, 55(2), 75-80. (in English)
- Nguyen, Q. T., et al. (2013). Composite materials for next generation building facade systems. *Civil Engineering and Architecture*, 3, 88-95. (in English)
- Pantazis, E., & Gerber, D. A. (2018). Framework for generating and evaluating facade designs using a multi-agent system approach. *International Journal of Architectural Computing*, 16(4), 248-270. (in English)
- Babii, I. M., et al. (2019). Doslidzhennia ekspluatatsiinoi efektyvnosti system zovnishnoi teploizoliatsii fasadiv. *Visnyk PDABA*, 4, 10-15. (in Ukrainian)
- Borysenko, O. B., et al. (2013). Eksperymentalni doslidzhennia temperaturnykh deformatsii teploizoliatsiinykh materialiv fasadnykh system z shtukaturnym sharom. *Resursoekonomni materialy, konstruktсии, budivli ta sporudy*, 25, 21-26. (in Ukrainian)
- DBN V.2.6-33:2018 (2018). *Konstruktсии zovnishnykh stin iz fasadnoiu teploizoliatsiieiu*. Kyiv: Derzhavni budivelni normy. (in Ukrainian)
- Zhukovskiy, K. O. (2020) *Obgruntuvannia vyboru konstruktyvnykh rishen fasadnoi systemy Saray Cotta pry budivnytstvi palatsu sportu «Yunist» v misti Zaporizhzhia: kvalifikatsiina robota mahistra*. Zaporizhzhia. (in Ukrainian)
- Menylyuk, A. I., et al. (2008). *Sovremennyye fasadnye sistemy*. Kiev: «Osvita Ukrainy». (in Russian)
- Meneiliuk, O. I., et al. (2016). Rozrobka kontseptsii proektu utepлення fasadiv bahatopoverkhovoho zhytloвого budynku. *Budivne vyrobnytstvo*, 16, 36-43. (in Ukrainian)
- Skokova, A. O. (2015). Remont fasadnoi teploizoliatsii budynkiv iz oporiadzhenniam tonkosharovoii shtukaturkoii: stan pytannia v budivelnomu vyrobnytstvi Ukrainy. *Resursoekonomni materialy, konstruktсии, budivli ta sporudy*, 30, 415-422. (in Ukrainian)
- Radkevych, A. V., Anin, V. I., Radchenko, V. V., & Shuvaiev, A. A. (2021). Analiz mozhlyvosti pokrashchennia yakosti uteplyuvachiv z vtorynnoi syrovyny ta perspektyvy yikh zastosuvannia v budivnytstvi. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 19, 85-90. (in Ukrainian)
- Tsyhanenko, L. A., & Zholobko, A. I. (2015). Doslidzhennia roboty nesuchykh elementiv navisnoi fasadnoi systemy. *Visnyk SNAU, Budivnytstvo*, 10, 61-6. (in Ukrainian)
- Chebyshev, M. V. (2013). Innovatsii i prystroi ventylovanoho fasadu. *Prykladna heometriia ta inzhenerna hrafika*, 91, 488-492, 104. (in Ukrainian)
- Cherniavskiy, V. V., et al. (2010). Analiz rozkryttia trishchyn dekoratyvno-shtukaturnoho sharu fasadnoi systemy zalezho vid temperatury ta volohosti zovnishnoho povitria. *Zbirnyk naukovykh prats PNTU im. Yu. Kondratiuka. Ser. : Haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo*, 2, 147-151. (in Ukrainian)
- Yakym, R. Ya., & Uzhehova, O. A. (2011). Tekhnolohiia oblashtuvannia fasadiv budynkiv navisnymy fasadnymy systemamy z ventyliatsiieiu. *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia*, 40(2), 581-588. (in Ukrainian)

Надійшла до редколегії 10.09.2023.

Прийнята до друку 26.10.2023.