

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Сучасні технології
та методи розрахунків у будівництві

Збірник наукових праць

Випуск 18

Луцьк – 2022

У збірнику висвітлюються результати наукових досліджень будівельних матеріалів і конструкцій; технологій зведення та експлуатації будівель, інженерних і транспортних систем; теорії опору елементів будівельних конструкцій зовнішнім впливам та методів розрахунку; сучасних тенденцій проектних рішень у будівництві; енергоефективних технологій у міському будівництві та господарстві.

Призначений для науковців, фахівців проектних установ і виробничих підприємств, докторантів, здобувачів вищої освіти.

Редакційна колегія:

Головний редактор – **Шваб'юк В.І.**, д.т.н., професор (ЛНТУ, Луцьк)

Заступник редактора – **Пастернак Я.М.**, д.ф.-м.н., професор (ЛНТУ, Луцьк)

Відповідальний секретар – **Ротко С.В.**, к.т.н., доцент (ЛНТУ, Луцьк)

Азізов Т.Н., д.т.н., професор (УДПУ, Умань); **Андрійчук О.В.**, к.т.н., доцент (ЛНТУ, Луцьк); **Бабич Є.М.**, д.т.н., професор (НУВГП, Рівне); **Белятинський А.О.**, д.т.н., професор (НАУ, Київ); **Дробишинець С.Я.**, к.т.н., доцент (ЛНТУ, Луцьк); **Жданюк В.К.**, д.т.н., професор (ХНАДУ, Харків); **Задорожнікова І.В.**, к.т.н., доцент (ЛНТУ, Луцьк); **Ільчук Н.І.**, к.т.н., доцент (ЛНТУ, Луцьк); **Карась Славомір**, доктор інженерії (Люблінська політехніка, Польща); **Кислюк Д.Я.**, к.т.н., доцент (ЛНТУ, Луцьк); **Клименко Є.В.**, д.т.н., професор (ОДАБА, Одеса); **Кочкарьов Д.В.**, д.т.н., доцент (НУВГП, Рівне); **Мікулич О.А.**, д.т.н., професор (ЛНТУ, Луцьк); **Максимович О.В.**, д.т.н., професор (НУ "ЛП"); **Наумов В.С.**, д.т.н., професор (Краківська політехніка, Польща); **Пасічник Р.В.**, к.т.н., доцент (ЛНТУ, Луцьк); **Пустульга С.І.**, д.т.н., професор (ЛНТУ, Луцьк); **Савенко В.Я.**, д.т.н., професор (НТУ, Київ); **Самчук В.П.**, к.т.н., доцент (ЛНТУ, Луцьк); **Синій С.В.**, к.т.н., доцент (ЛНТУ, Луцьк); **Сунак П.О.**, к.т.н., доцент (ЛНТУ, Луцьк); **Трач В.М.**, д.т.н., професор (НУВГП, Рівне); **Ужегова О.А.**, к.т.н., доцент (ЛНТУ, Луцьк); **Ужегов С.О.**, к.т.н., доцент (ЛНТУ, Луцьк); **Чапюк О.С.**, к.т.н., доцент (ЛНТУ, Луцьк); **Шишкін О.О.**, д.т.н., професор (КНУ, Кривий Ріг).

Зареєстрований Державною реєстраційною службою України (свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 20340-10140Р від 31.05.2013).

Включений Міністерством освіти і науки до переліку наукових фахових видань України (категорія Б) за спеціальностями 113 – Прикладна математика; 122 – Комп'ютерні науки (наказ МОН України, № 409 від 17.03.2020 р.); 192 – Будівництво та цивільна інженерія (наказ МОН України, № 886 від 02.07.2020 р.).

Матеріали збірника рекомендовані до друку на засіданні вченої ради Луцького національного технічного університету (протокол № 5 від 27 грудня 2022 р.).

Адреса редакції: 43018, м. Луцьк, вул. Потебні, 56, ЛНТУ, кафедра будівництва та цивільної інженерії, e-mail: Zbirnukfbd@gmail.com,
<http://eforum.lntu.edu.ua/index.php/construction>, телефон (0332) 26-24-60

**СВІТЛОВІ ІНСТАЛЯЦІЇ ЯК СПОСІБ ФОРМУВАННЯ ОБРАЗУ
ПРОСТОРУ МІСТА**

**LIGHTING INSTALLATIONS AS A WAY OF FORMING THE
IMAGE OF THE CITY SPACE**

Абрамюк І.Г., к. арх., доцент, Казмірук Ю.Й., доцент кафедри архітектури та дизайну (Луцький національний технічний університет)

Abramyuk I., Doctor of Architecture, associate professor, Kazmiruk Y. associate professor of the Department of Architecture and Design (Lutsk National Technical University)

Сучасні технології та їх стрімкий розвиток зумовлюють появу нових методів та способів створення естетично наповненого, емоційно-комфортного міського середовища за допомогою світлових тематичних інсталяцій. У статті здійснено аналіз появи та розвитку світлового мистецтва у світі як виду художньо-проектної діяльності, особливості формотворення у їх проектуванні, здійснено їх класифікацію за характером взаємодії з глядачем. Художній образ побудований за допомогою світла, покликаний відбитися у свідомості глядача оточуючу його дійсність, привернути увагу до змісту життєвих явищ, через нього пізнати значення, думку, ідею.

The emergence and development of cities were accompanied by a long search for ways, methods, and means of creating a comfortable urban environment. One of the means of creating urban space is light, in particular, artificial light as the main tool in shaping the aesthetics of city architecture. Today, the light design of urban spaces ceases to be an auxiliary, formative field of activity in architecture and becomes a technique that enables the emergence of new cultural and aesthetic objects.

The purpose of the article is to identify the varieties and methods of using light in the form of light installations during the compositional form of the image of the urban space. With the help of light installations, spotlights, and backlights, the architecture of the building is strengthened, and the night view of the architectural composition is formed; light installations, sculptures, and decorations generate plasticity and dynamics of space. Techniques of architectural and decorative lighting: contour lighting (light graphics) - is used in the design of city buildings to enhance the silhouette perception of the stylistic features of the architecture. Illumination of individual fragments of buildings - used to emphasize the architectural details of architectural monuments. lighting from the inside - is used to achieve the effect of lighting the building "on the skylight".

In connection with the growing role of light installations in creating the image of a night city or the space in which they are realized, the features of the ideological content play an important role in their design. Therefore, according to these features, they can be conditionally divided into three groups: social (social-festive, social-problematic),

conceptual, and commercial. The specificity of the artistic image and approaches to its formation make it possible to divide light installations into the following subspecies: anthropomorphic installation; zoomorphic installation; phytomorphic installation; an installation depicting natural phenomena; object-subject installation; abstract installation.

Ключові слова: міський простір, архітектура, освітлення, світлова інсталяція, художній образ, прийоми архітектурного освітлення.

Keywords: urban space, architecture, lighting, light installation, artistic image, techniques of architectural lighting.

Постановка проблеми. Виникнення та розвиток міст супроводжувалися тривалим шляхом пошуків способів, методів, засобів формування комфортного міського середовища. Цей шлях зумовлений безперервним бажанням людини створити середовище, яке відповідало б її естетичним, психологічним та утилітарним вимогам. Одним із засобів творення міського простору є світло, зокрема, штучне світло як основний інструмент у формуванні естетики архітектури міста. Сьогодні світловий дизайн міських просторів перестає бути допоміжною, оформлювальною сферою діяльності в архітектурі, а стає прийомом, котрий уможлиблює появу нових культурно-естетичних об'єктів.

Власне, питання міської ілюмінації потребує комплексного вивчення, оскільки окрім утилітарної функції освітлення вулиць і площ, підсвічування пам'яток архітектури, досить часто шляхом організації світлових інсталяцій різних типів є способом привертання уваги суспільства до глобальних проблем людства.

Аналіз досліджень і публікацій. Тематика дослідження питання формування композиції міського простору за допомогою світла є надзвичайно актуальною темою, оскільки новітні технології та підходи до проектування світлових установок удосконалюються із шаленою швидкістю. Вивчення штучного світлового середовища міст розпочалося із появою штучного освітлення, а розмаху цей процес набрав у 1920-30-их роках. Зі збільшенням кількості світла в містах і його здатності впливати на сприйняття образу міста з'явилася значна кількість нових концепцій, таких, як світловий урбанізм, світлова архітектура (нічне підсвічування), дизайн, творений світлом, інсталяції, об'єкти світлового мистецтва [2]. Принципи формування світло-кольорового середовища сучасного міста розкриваються у роботах Дубинського В.П., Кліщ О.А. Проблеми світлового дизайну в місті висвітлила Радомська В.Р. Попри це, сьогодні немає комплексного вивчення питання ролі світлових інсталяцій у дизайні та аспектів художнього формотворення, що є актуальною проблемою мистецтва та архітектури.

Мета статті – виявлення різновидів та прийомів застосування світла у вигляді світлових інсталяцій під час композиційного формування образу міського простору.

Вклад основного матеріалу дослідження. Процес формування світлового середовища сучасного міста, в сучасних умовах розвитку урбодизайну стає складним неоднозначним явищем, яке змінює емоційно-психологічне сприйняття поняття «світло-кольорове середовище» сучасного міста як особливий об'єкт архітектурного проектування, формуючими компонентами якого є антропогенні та природні елементи міського середовища із пристроями й установками штучного освітлення. Визначено, що світло-кольорове середовище є складною системою, в котрій активно взаємодіють відкриті та закриті архітектурні простори з джерелами й приладами штучної люмінесценції [1], що дає можливість забезпечити коло необхідних для життєдіяльності людини функцій у міському середовищі.

Із моменту появи електричного освітлення міський простір зазнав незворотніх змін, оскільки нові джерела світла, які постійно удосконалювалися, відкрили багато можливостей при творенні світлового середовища. В 1883 р. у центрі Мінеаполісу, США, встановлено світлову композицію «Електричний місяць» із восьми дугових ламп, метою якої стала демонстрація суспільству безпечності, ефективності та елегантності електричного світла, й котра дала поштовх до активного створення і поширення світлових інсталяцій.

У 1912 р. французький винахідник Ж. Клод продемонстрував світу перші неонові лампи у вигляді багряних смужок на Паризькій опері. У 60-х рр. XX ст. художники Д. Флавін та Ф. Мореллі при створенні авторської скульптури та інсталяції використовували різні типи світла: неонові трубки, флуоресценцію чи розсіяне освітлення.

У 1966 р. в США з'явився рух «Світло і Простір Каліфорнії», представники якого (Джеймс Тарелл, Роберт Ірвін, Дуглас Уілер) експериментували зі світлом і його впливом на сприйняття людини. Аналіз цього сприйняття привів до створення простору з ретельно прорахованими світлом, яке викликало у глядачів оптичні ілюзії.

Сьогодні ж світлове середовище міста формується із симбіозу двох напрямків: утилітарного освітлення міст і мистецтва, твореного засобами світла, характер якого впливає на творення архітектури нічного міста й продукує новий тип аранжациі міста – світловий дизайн (Lighting Design) [2].

Оксана Кліщ у своєму дисертаційному дослідженні виокремила підвиди світлового мистецтва у містах та зазначила, що до них включають «...кінетичні форми візуальної інформації (медіа-фасади, відеоекрани, динамічне освітлення архітектури, світломузичні шоу, світломузику

фонтанів, інтерактивні світлові об'єкти, що спонукають до залучення соціуму, «північне сяйво», світлову нанофактуру чи відеомапінг), малі архітектурні форми та скульптури, що набувають інтенсивності в темний час доби, світлові проєкції на фасади (сюжетні, декоративні, деструктивні, історичну реконструкцію, підсилення існуючих властивостей), моделюючі простір (світлові тунелі, арки, завіси), концептуальні світлові інсталяції (меморіальні, функціональні, «фальшива архітектура», «рестарт», гуманізація простору), світлову типографіку, оптичну ілюзію, декорацію архітектури, святкову ілюмінація, лазерні шоу, вшанування традицій» [2].

Власне, в сучасних реаліях розвитку світлового мистецтва архітектурне освітлення – це своєрідна художня гра світла, яка втілює оригінальні дизайнерські задуми у форми фасадів. За допомогою підсвічування фасадів будівель, будинків, пам'яників можна підкреслити силует будівлі або змінити звичний денний вигляд у нічний час доби. За допомогою світлових установок, прожекторів, підсвіток підсилюється архітектоніка будівлі, формується нічний вигляд архітектурної композиції; світлові інсталяції, скульптури, декорації генерують пластику та динаміку простору. Правильно спроектоване освітлення характеризується, крім майстерно виділеної точки притягання погляду, наявністю фокусних точок інших експонованих фрагментів фасаду, які привертають увагу спостерігача після точки притягання погляду [3].

Прийоми архітектурно-декоративного освітлення:

контурне освітлення (світлова графіка) – використовується при оформленні забудови міста для підсилення силуетного сприйняття стильових особливостей архітектури.

підсвітка окремих фрагментів споруд – використовується для підкреслення архітектурних деталей пам'яток архітектури.

освітлення зсередини – застосовується для досягнення ефекту просвічування будівлі «на просвіт». Такого типу освітлення можна створити, використовуючи світло інтер'єрів (наприклад, у виставкових залах, галереях, музеях, торговельних центрах), яке проходить через вікна, вітражі, вітрини. Досить часто освітлення зсередини поєднується із екстер'єрним освітленням, створюючи ефект «перетікаючого простору», тобто архітектурного рішення, при якому внутрішнє світло переходить у зовнішнє.

Нині світлові інсталяції, які залучають глядача до розуміння соціальних, культурних і глобальних проблем, є домінуючими у формуванні архітектури світлового образу міського простору. Сучасні технології дають необмежені можливості творцям світлового мистецтва при проектуванні різногабаритних та різнофункціональних світлових інсталяцій, котрі характеризуються, за твердженням Оксани Кліщ, «...змінюю напрямків пучків світла, форм світлових тіл, кольору, ритму за допомогою нових інтелектуальних технологій – комп'ютерних програм та

датчиків, що керують освітленням, реагуючи на присутність пішоходів і зміни траєкторії їх руху, температури повітря, сили вітру, освітленості території та ін. » [2].

У зв'язку зі зростанням ролі світлових інсталяцій у творенні образу нічного міста чи простору, у якому вони реалізуються, важливу роль у їх проектуванні відіграють особливості ідейного наповнення. Тому за цими особливостями їх можна умовно поділити на три групи: *соціальну (соціально-святкову, соціально-проблемну), концептуальну, комерційну*.

Світлові інсталяції соціального характеру поділяються на соціально-проблемні та соціально-святкові. До першої підгрупи відносяться світлові інсталяції, які в своїй сутності порушують певну соціальну проблему та загострюють увагу глядачів на присутності таких проблем, спонукають до їх переосмислення та вирішення. Наприклад світлова інсталяція від іспанського об'єднання «Luzinterruptus», котра була встановлена в місті Вінтертур (Швейцарія), присвячена проблемі забруднення вулиць сміттям. Робота «Plastic garbage guarding the museum» стала символом глобальної проблеми засмічення планети [4]. Об'єктами інсталяції є два великі кошики, наповнені сміттєвими пакетами, які світяться зсередини (рис. 1).



Рис. 1. Світлова інсталяція «Plastic garbage guarding the museum». Вінтертур, Швейцарія

До творчого доробку групи «Luzinterruptus» належить робота «Agua potable corriendo por las calles» («Питна вода, що тече по вулицях»), яка має вигляд чотирьох громадських фонтанів із водою зі скляних підсвічених флаконів [5]. Інсталяція призначена привернути увагу до браку питної води на вулицях Мадриду та відсутності питних громадських фонтанів (рис. 2).



Рис. 2. Інсталяція «Agua potable corriendo por las calles».
Мадрид (Іспанія)

Характерними особливостями другої підгрупи є їх соціальна значущість, але разом з тим – відсутність в мистецькому задумі ідеї привернення до соціальної проблеми. Такі інсталяції проектуються до певного дня урочистого святкування. Зокрема, проект від дизайнерської студії «RAW» під назвою «Prismatica» в місті Монреаль (Канада) [6] є яскравим прикладом застосування комбінованого (природного/штучного) світла в новорічній інсталяції. «Prismatica» – скупчення 50 двометрових обертових призм, встановлених на площі Фестивалів (Place des Festivals), що значно змінило вигляд простору центру міста (рис. 3). Всі п'ятдесят призм виготовлені з панелей, обтягнутих ламінованою плівкою, яка здатна відбивати світло у видимому спектрі. В основу призм вмонтовані світлові проектори, а саме обертання супроводжується дзвоном дзвіночків.

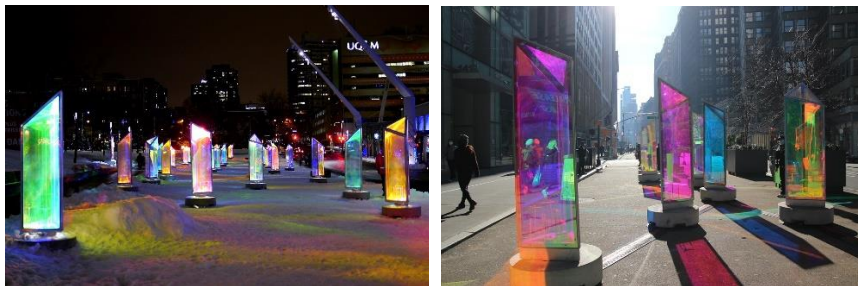


Рис. 3. Проект «Prismatica» від дизайнерської студії «RAW». Монреаль (Канада)

Комерційні світлові інсталяції виконують основне завдання привернення уваги глядача до товару чи послуги виробника. Можна стверджувати, що світлові інсталяції є інформаційним прийомом, який забезпечує необхідний рекламний вплив на глядача. В інтерактивній медіа-архітектурі застосовуються системи штучного, найчастіше світло-динамічного освітлення, яке піддається керуванню і відіграє основну роль у зображенні комерційної реклами. Наприклад, компанія Philips виступила спонсором створення фестивально-комерційної інсталяції Incandescence («Розжарювання») з дев'яти ламп у Ліоні (Франція) [7] (рис. 4).



Рис. 4. Інсталяція Incandescence від Philips та дизайнерки Северин Фонтейн (Severine Fontaine). Ліон (Франція)

Світлові інсталяції творчого самовираження – це твори, які виражають емоційний стан художників та дизайнерів. Інсталяції концептуально характеру розцінюються митцями, як спосіб заявити про себе, представити свої ідеї усьому світові у формі мистецького проекту, який приносить естетичне задоволення. Прикладом такої інсталяції може стати незвичайна «фальшива архітектура» висотою 12 метрів – Nebula («Нестабільність») від Zotes, розташована у Роскільдї (Данія) (рис. 5). Об'єкт «фальшивої архітектури» покликаний відобразити непостійність

життя у великих містах, метушню та мінливість повсякденності мегаполісу [8].

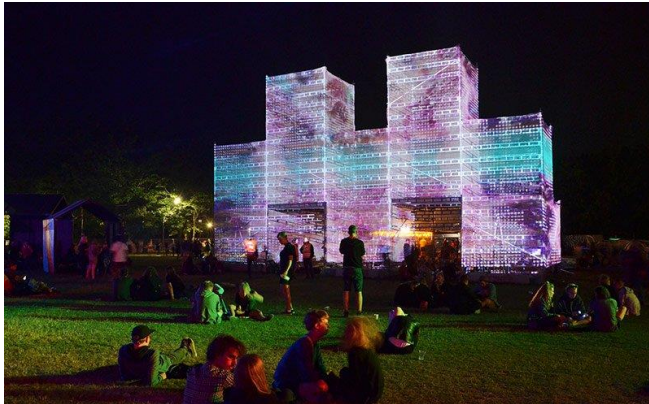


Рис. 5. Світлова інсталяція Nebula. Роскільд (Нідерланди)

Специфіка художнього образу та підходи до його формотворення дають можливість поділити світлові інсталяції на такі підвиди:

- антропоморфна інсталяція (образ людини) ;
- зооморфна інсталяція (образ тварин, риб тощо) ;
- фітоморфна інсталяція (образ рослин) ;
- інсталяція із зображенням природних явищ;
- об'єктно-предметна інсталяція (предмети побуту та ін., архітектурні об'єкти);

- абстрактна інсталяція (вираження образу засобами геометричних фігур, ліній, кольорових плям, звуків);

Художній образ, відображений за допомогою світла, покликаний відбити у свідомості глядача оточуючу його дійсність, привернути увагу до змісту життєвих явищ, через нього пізнати значення, думку, ідею.

Висновки. Місце, роль світлової інсталяції, як креативної форми застосування новітніх технологій, котра є однією із основних засобів для композиційного формування образу міської структури, передбачають виконання світлом одразу декількох функцій. Світлова інсталяція в художньо-проектній культурі міста може виконувати функції, як штучного (функціонального) освітлення міських об'єктів та простору, так і стати цілодобовим декоративним, атрактивним елементом кожного міста.

References

1. Doby`ns`ky`j V. P. Arxitekurno-xudozhni pry`ncy`py` formuvannya svitlo-kol`orovogo seredovy`shha suchasnogo mista: avtoref. dy`s. ... kand. arxitektury` : specz. 18.00.01. Xarkiv, 2007. 20 s.

2. Klishh O.A. Svitlova instalyaciya yak zasib kompozy`cijnogo formuvannya obrazu mis`kogo prostoru: dy`s kand. arxitektury` : specz. 18.00.01. L`viv, 2015. s. 45.

3. Radom's'ka V.R., Smakous M., Ty`rpy`ch I.A.. Problematy`ka svitloвого dy`zajnu v mis`komu seredovy`shhi. My`stecztvoznavstvo, arxitektura ta budivny`ctzvo. Teoriya arxitektury`, restavraciya pam'yatok arxitektury`. 2016. №5. s. 1-6.

4. Luzinterruptus: plastic garbage guarding the museum. URL: <https://www.designboom.com/art/luzinterruptus-plastic-garbage-guarding-the-museum/>

5. Luzinterruptus. Agua potable corriendo por las calles. URL: <https://divisare.com/projects/190923-luzinterruptus-gustavo-sanabria-agua-potable-corriendo-por-las-calles>

6. 50 Prisms Emit Colorful Lights on the Streets of Montreal. URL: <https://mymodernmet.com/raw-prismatica-installation/>

7. Gy`gantsky`e lampochky` - grandy`oznaya svetovaya y`nstallyacy`ya v Ly`one. URL: https://worldartdalia.blogspot.com/2014/12/blog-post_835.html

8. Nebulae by Marcos Zotes. URL: <https://www.frameweb.com/article/nebulae-by-marcos-zotes>

Список використаної літератури

1. Дубинський В. П. Архітектурно-художні принципи формування світло-кольорового середовища сучасного міста: автореф. дис. ... канд. архітектури: спец. 18.00.01. Харків, 2007. 20 с.

2. Кліщ О.А. Світлова інсталяція як засіб композиційного формування образу міського простору: дис. канд. архітектури: спец. 18.00.01. Львів, 2015. с. 45.

3. Радомська В.Р., Смакоус М., Тирпич І.А.. Проблематика світлового дизайну в міському середовищі. Мистецтвознавство, архітектура та будівництво. Теорія архітектури, реставрація пам'яток архітектури. 2016. №5. С. 1-6.

4. Luzinterruptus: plastic garbage guarding the museum. URL: <https://www.designboom.com/art/luzinterruptus-plastic-garbage-guarding-the-museum/>

5. Luzinterruptus. Agua potable corriendo por las calles. URL: <https://divisare.com/projects/190923-luzinterruptus-gustavo-sanabria-agua-potable-corriendo-por-las-calles>

6. 50 Prisms Emit Colorful Lights on the Streets of Montreal. URL: <https://mymodernmet.com/raw-prismatica-installation/>

7. Гигантские лампочки - грандиозная световая инсталляция в Лионе. URL: https://worldartdalia.blogspot.com/2014/12/blog-post_835.html

8. Nebulae by Marcos Zotes. URL: <https://www.frameweb.com/article/nebulae-by-marcos-zotes>

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-СТАТИСТИЧНІ МОДЕЛІ ДЛЯ
ПРОГНОЗУВАННЯ НАДІЙНОСТІ ТА НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ
НОРМАЛЬНИХ ПЕРЕРІЗІВ ПОПЕРЕДНЬО НАПРУЖЕНИХ
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК**

**STATISTICAL MODELS FOR PREDICTING THE RELIABILITY AND
BEARING CAPACITY OF NORMAL SECTIONS OF PRESTRESSED
REINFORCED CONCRETE BEAMS**

**Агасєва О.А., к.т.н., доц., Сьоміна Ю.А., к.т.н., доц.,
Постернак О.О., к.т.н., доц. (Одеська державна академія будівництва
та архітектури, Одеса)**

**Ahaieva O.A., Ph.D. in Engineering, Associate Professor,
Somina Yu.A., Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Posternak O.O.,
Ph.D. in Engineering, Associate Professor (Odesa State Academy of Civil
Engineering and Architecture, Odesa)**

Розроблені адекватні експериментально-статистичні моделі, які дозволяють достовірно визначати розрахункову надійність та несучу здатність нормальних перерізів попередньо напружених залізобетонних конструкцій для різних поєднань вихідних конструктивних чинників. Одночасно досліджені значення характеристик надійності та несучої здатності вказаних конструкцій в залежності від використаних в них класу бетону, класу арматури та коефіцієнту армування.

Effective regulation of the material consumption of buildings and structures and their safe operation are possible only with a precise assessment of the reliability and bearing capacity indices of building elements.

Ukrainian and European standards allow the design of prestressed reinforced concrete beams with a sufficient level of bearing capacity, confirmed by many years of engineering practice. However, the actual reliability level of such elements at the design stage is unknown. In some cases, it turns out to be overestimated and causes an overrun of materials. Also, it can be, on the contrary, insufficient, which leads to additional costs for eliminating the consequences of failures during operation. The main problem in using the reliability theory for the design of reinforced concrete structures is the need to accumulate a large amount of statistical data and the complexity of computational work. Therefore, it is necessary to develop a simpler reliability assessment apparatus for practical use.

The authors of the article carried out a large number of numerical experiments. As a result of these experiments, adequate statistical models of the design reliability and bearing capacity of normal sections of prestressed reinforced concrete rectangular

beams have been obtained. The main advantage of these models is that they allow the designer to explore both the direction of the change in the bearing capacity and the reliability index with the change in the initial design factors - the concrete class, the class of bar reinforcement, the class of wire reinforcement, and the reinforcement ratio.

It has been established that the influence of specified design factors on the design reliability indices and the design bearing capacity of beam structures with a rectangular section is mainly of a multidirectional nature. In this case, it is necessary to search for compromise solutions that comprehensively take into account all the parameters and are achieved through mutual concessions in "conflict" situations.

Ключові слова: експериментально-статистичні моделі, надійність, несуча здатність, залізобетонні конструкції, попередньо напружена арматура.

Keywords: statistical models, reliability, bearing capacity, reinforced concrete structures, prestressing reinforcement.

Постановка проблеми та аналіз відомих досліджень. Сучасні нормативні документи [1-3] дозволяють проєктувати попередньо напружені залізобетонні конструкції з достатнім рівнем несучої здатності, що підтверджується багаторічною практикою їх експлуатації. Проте фактичний рівень надійності таких конструкцій на стадії розробки проєкту залишається невідомим. У деяких випадках він виявляється завищеним і зумовлює перевитрату матеріалів або ж, навпаки, недостатнім, що призводить до додаткових витрат на ліквідацію наслідків відмов при експлуатації [4-9].

Основною перешкодою у використанні теорії надійності при проєктуванні будівельних конструкцій є труднощі, пов'язані з великим обсягом і складністю обчислювальної роботи, тому для практичної оцінки їх надійності важливим є розробка більш простого розрахункового апарату.

Крім того, в ході аналізу літературних джерел [6, 10] та результатів власних досліджень [11, 12] встановлено, що вплив різних конструктивних чинників на розрахункові характеристики надійності та розрахункову несучу здатність нормальних перерізів прямокутних балкових конструкцій має, в основному, різнонаправлений характер і вимагає проведення більш детальних досліджень.

Мета і завдання статті. Використовуючи теорію планування експерименту, розробити придатні для практичного застосування експериментально-статистичні моделі для оцінки розрахункової надійності попередньо напружених залізобетонних конструкцій із забезпеченням несучої здатності нормальних перерізів. На основі отриманих моделей з'ясувати комплексний вплив конструктивних чинників на вказані вихідні параметри як зокрема, так і у їхній взаємодії. Знайти спільні точки чи

області перетину графіків розрахункових характеристик надійності та розрахункових значень несучої здатності з метою раціонального використання матеріальних ресурсів при проектуванні вказаних конструкцій та пошуку компромісних рішень.

Виклад основного матеріалу

Попередні дослідження [10-12] показали, що найбільший вплив на характеристики надійності та несучу здатність нормальних перерізів має кількість поздовжнього армування $\rho_{l,p}$, клас бетону C і арматури $f_{p0,1k}$. Виходячи з цього, при проведенні числових експериментів у якості дослідних конструктивних чинників обрані (табл. 1): коефіцієнт поздовжнього армування $\rho_{l,p}$ (фактор x_1), клас бетону C (фактор x_2), клас стержневої арматури (фактор x_3 , серія А) і клас арматури з дроту та канатів (фактор x_3^* , серія Б*).

Вказані серії числових експериментів виконували за трифакторним трирівневим D-оптимальним планом Бокса-Бенкіна В3. Обраний план експерименту зумовлений тим, що дослідні чинники варто апроксимувати поліномом другого ступеня, розрахованим з використанням методу найменших квадратів, так як вони мають нелінійний вплив на функцію виходу (підкоряється закону Гауса).

Таблиця 1

Характеристика дослідних факторів та рівнів їх варіювання (серії А, Б*)

Код	Найменування фактору	Рівні варіювання			Інтервал варіювання	Примітка
		«-1»	«0»	«+1»		
x_1	Коефіцієнт поздовжнього армування $\rho_{l,p}$	0,010	0,015	0,020	0,005	Розміри дослідних балок: $l = 600$ см; $h = 40$ см; $b = 20$ см; $d = 36$ см.
x_2	Клас бетону C , МПа	C32/40	C40/50	C50/60	10	
x_3	Клас стержневої арматури $f_{p0,1k}$, МПа	575 (A600)	765 (A800)	955 (A1000)	190	
x_3^*	Клас арматури із дроту та канатів $f_{p0,1k}$, МПа	1240 (Bp1300)	1355 (K1400)	1430 (Bp1500)	95	

В результаті обробки даних, отриманих в роботах [11, 12], з використанням розробленого в Одеській державній академії будівництва та архітектури програмного комплексу COMPEX, отримали адекватні експериментально-статистичні моделі розрахункових характеристик

надійності β та несучої здатності M_u нормальних перерізів (серія А) балкових попередньо напружених залізобетонних конструкцій прямокутного перерізу зі стержневою арматурою:

$$\hat{Y}(\beta_A) = 5,41 + 0,10x_2 + 1,52x_3 + 1,58x_3^2 + 0,26x_2x_3, \quad (1)$$

коефіцієнт варіації $C_v = 6,1\%$;

$$\begin{aligned} \hat{Y}(M_{u,A}) &= 244,86 + 62,47x_1 + 11,12x_2 + 46,37x_3 - \\ &- 5,88x_1^2 + 6,89x_1x_2 + 7,53x_1x_3, \text{ кНм}, \quad (2) \\ C_v &= 2,5\%. \end{aligned}$$

Значною перевагою представлених адекватних експериментально-статистичних моделей є те, що вони дозволяють комплексно проаналізувати вплив кожного дослідного фактора на надійність та несучу здатність розглянутих конструкцій, тобто, не тільки в окремо взятій серії, а й за всіма серіями разом.

Аналізуючи розрахункові значення характеристики надійності (1) та несучої здатності (2) нормальних перерізів попередньо напружених залізобетонних конструкцій зі стержневою арматурою (серія А), слід констатувати однакову направленість впливу на них обраних конструктивних чинників: з їх збільшенням збільшуються також, як правило, зазначені вихідні параметри (рис. 1, а, б, в). При цьому, спостерігаються лінії перетину поверхонь β_A і $M_{u,A}$ (рис. 1, г, д) при $\rho_{l,p} < 0,01$ і $f_{p0,1k} \leq 955$ МПа. Отже, для отримання компромісних значень характеристики надійності β_A і несучої здатності $M_{u,A}$ нормальних перерізів залізобетонних конструкцій у даній серії дослідів доцільно приймати наступні величини конструктивних чинників: коефіцієнт поздовжнього армування стержневою арматурою $\rho_{l,p} = 0,015 \dots 0,020$, клас цієї арматури А800...А1000 при середніх класах бетону С32/40...С50/60 (рис. 1, г, д). Поверхні характеристик надійності та несучої здатності дослідних елементів перетинаються при значеннях $\beta_A = 7,61 \dots 8,20$ і $M_{u,A} = 274,08 \dots 295,86$ кНм (рис. 1, г) при використанні арматури високих класів.

Аналіз експериментально-статистичної моделі (1) показує (рис. 1), що найбільший позитивний вплив на величину характеристики надійності β_A дослідних елементів має клас стержневої арматури, а потім, клас бетону в той час, як кількість поздовжньої арматури практично не впливає на цю характеристику.

Серія А

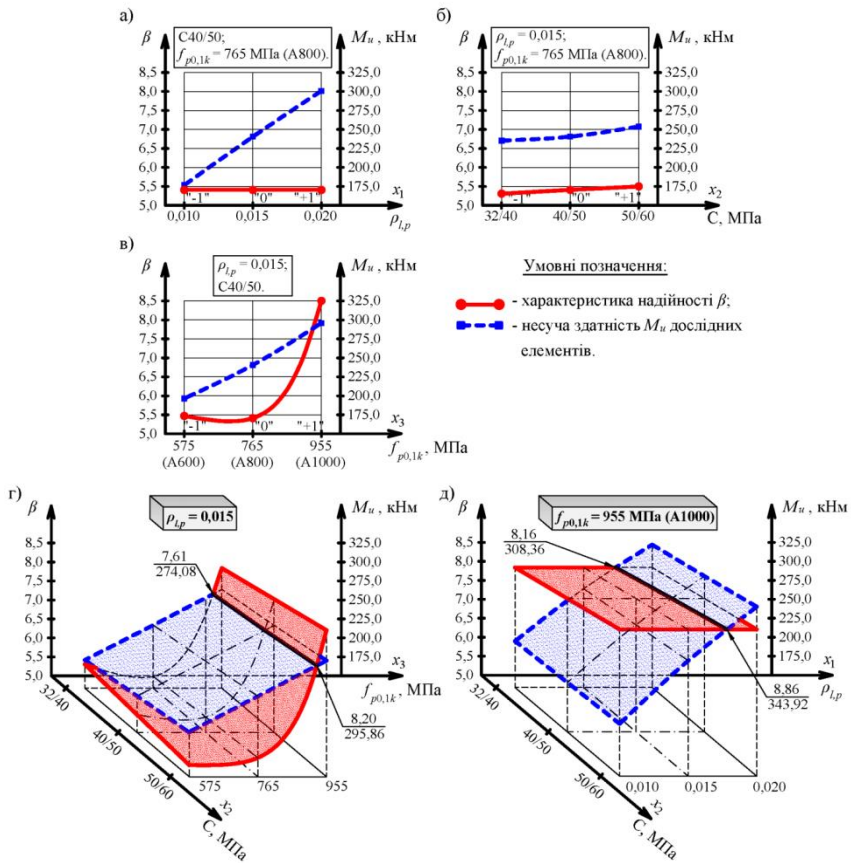


Рис. 1. Графіки впливу конструктивних чинників (коефіцієнта армування (а), класу бетону (б), класу стержневої арматури (в) на міцність нормальних перерізів M_u та показник надійності β попередньо напружених залізобетонних елементів. Комплексний вплив вказаних факторів на β і M_u (г, д)

Отже, характеристика надійності розрахункової міцності нормальних перерізів β_A попередньо напружених балкових конструкцій зростає по відношенню до її середнього значення 5,41:

- зі збільшенням класу стержневої арматури від А600 до А1000 на 56,2%;

- зі збільшенням класу бетону від С32/40 до С50/60 на 3,7%.

Наявність квадратичного ефекту x_3^2 з додатнім знаком +1,58 свідчить про те, що з подальшим збільшенням цього чинника (класу стержневої арматури) за межами його зміни матиме місце різке зростання β_A .

Суттєво взаємодіють між собою класи бетону та арматури: при їх збільшенні значення β_A збільшуються.

Аналіз експериментально-статистичної моделі (2) показує (рис. 1), що найбільший вплив на несучу здатність (міцність) нормальних перерізів попередньо напружених залізобетонних конструкцій має коефіцієнт поздовжнього армування $\rho_{l,p}$, клас цієї арматури $f_{p0,1k}$ і клас бетону C .

Несуча здатність нормальних перерізів вказаних конструкцій зростає по відношенню до її середнього значення 244,86 кНм:

- зі збільшенням кількості робочої арматури від $\rho_{l,p} = 0,01$ до $\rho_{l,p} = 0,02$ на 51%;

- зі збільшенням класу арматури від А600 до А1000 на 38%;

- зі збільшенням класу бетону від С32/40 до С50/60 на 9%.

Квадратичний ефект « $-x_1^2$ » показує, що за межами зміни цього чинника несуча здатність таких конструкцій збільшуватиметься із затуханням. Суттєво взаємодіють між собою кількість робочого армування і клас бетону, кількість робочої арматури та її клас. З одночасним збільшенням цих чинників $M_{u,A}$ зростатиме.

Характерним для серії А є різнонаправленість характеристик надійності та несучої здатності нормальних перерізів залізобетонних конструкцій зі стержневою робочою арматурою, а також наявність ліній перетину поверхонь, що їх відображають.

Аналогічним чином були також отримані експериментально-статистичні моделі розрахункових характеристик надійності β та несучої здатності M_u нормальних перерізів (серія Б*) балкових попередньо напружених залізобетонних конструкцій прямокутного перерізу з дрютяною арматурою:

$$\begin{aligned} \hat{Y}(\beta_{B*}) &= 7,88 - 0,13x_1 + 0,48x_2 - 0,04x_3 - \\ &\quad - 0,22x_1^2 - 0,31x_2^2 - 0,98x_3^2, \\ C_v &= 5,8\%; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\hat{Y}(M_{u, B^*}) = 364,79 + 67,12x_1 + 32,31x_2 + 12,42x_3 - \\ - 17,24x_1^2 - 6,13x_2^2 - 2,33x_3^2 + 19,78x_1x_2, \text{ кНм}, \quad (4) \\ C_v = 1,4\%.$$

Характеристику надійності та несучу здатність нормальних перерізів можна охарактеризувати за експериментально-статистичними моделями (3), (4), аналіз яких показує, що всі конструктивні чинники мають нелінійний вплив на вказані вихідні параметри.

Отже, характеристика надійності β_{B^*} визначення міцності нормальних перерізів (3) дослідних елементів збільшується (рис. 2) по відношенню до середнього значення $\beta_{B^*} = 7,88$ при:

- зменшенні кількості поздовжнього армування у вигляді попередньо напружених дроту та канатів від $\rho_{l,p} = 0,02$ до $\rho_{l,p} = 0,01$ на 3%;
- збільшенні класу бетону від С32/40 до С50/60 на 12%;
- зменшенні класу дротяної арматури $f_{p0,1k}$ від 1430 до 1240 МПа на 1%.

При цьому, наявність квадратичних ефектів x_1^2 , x_2^2 , x_3^2 з від'ємними знаками свідчить про те, що за межами зміни вказаних конструктивних чинників характеристика надійності β_{B^*} зменшуватиметься (рис. 2, г).

Несуча здатність нормальних перерізів дослідних елементів із попередньо напруженою дротяною арматурою може бути охарактеризована адекватною експериментально-статистичною моделлю (4), аналіз якої показує, що M_{u, B^*} збільшується порівняно із середнім значенням $M_{u, B^*} = 364,79$ кНм при збільшенні:

- кількості поздовжнього робочого армування від $\rho_{l,p} = 0,01$ до $\rho_{l,p} = 0,02$ на 37%;
- класу бетону від С32/40 до С50/60 на 18%;
- класу дротяної арматури $f_{p0,1k}$ від 1240 до 1430 МПа на 7%.

Від'ємні знаки при квадратичних ефектах x_1^2 , x_2^2 , x_3^2 свідчать про те, що зміна вказаних дослідних чинників за вказаними в табл. 1 межами призводить до зменшення зазначених вихідних параметрів і появи локальних екстремумів (рис. 2, г).

Суттєво взаємодіють між собою кількість поздовжньої дротяної арматури і клас бетону, з одночасним збільшенням яких несуча здатність нормальних перерізів попередньо напружених дослідних конструкцій також істотно зростає.

Серія Б*

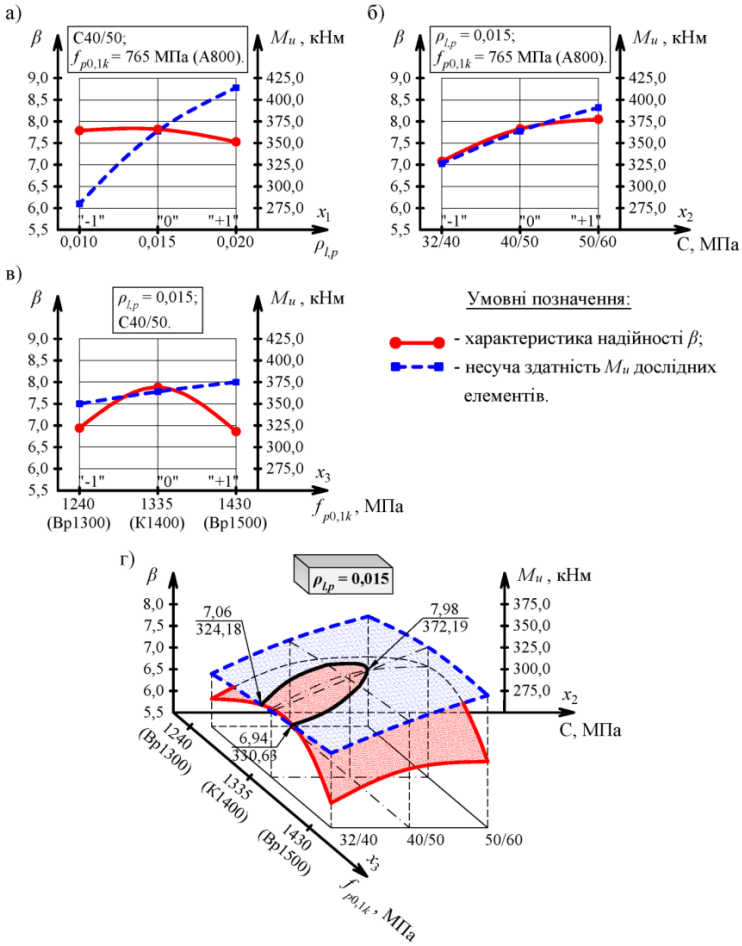


Рис. 2. Графіки впливу конструктивних чинників (коефіцієнта армування (а), класу бетону (б), класу дротяної арматури (в) на міцність нормальних перерізів M_u та показник надійності β попередньо напружених залізобетонних елементів. Комплексний вплив вказаних факторів на β і M_u (г)

Висновки. Представлені адекватні нелінійні експериментально-статистичні моделі (1)...(4) мають інформаційну корисність і дозволяють проаналізувати залежність характеристики надійності та несучої здатності

нормальних перерізів попередньо напружених залізобетонних конструкцій від класу бетону, класу і виду арматури та коефіцієнту армування не тільки окремо, а й у комплексній взаємодії. Вказані моделі будуть корисними при вирішенні оптимізаційних задач на стадії проектування з точки зору знаходження раціональних поєднань усіх зазначених параметрів та зменшення матеріалоемності будівництва.

Характеристики надійності та несуча здатність нормальних перерізів залізобетонних конструкцій, армованих попередньо напруженою стержневою арматурою, суттєво відрізняються від аналогічних показників елементів, армованих попередньо напруженою дротяною арматурою. Так, у першому випадку найбільший вплив на розрахункову характеристику надійності нормальних перерізів має клас стержневої арматури (56%), потім клас бетону (4%), в той час, як у другому випадку із дротяною арматурою визначальним є клас бетону (12%).

Основні конструктивні чинники мають різнонаправлений вплив на розрахункові характеристики надійності та несучу здатність нормальних перерізів попередньо напружених залізобетонних конструкцій, визначену за діючими нормами. При середніх значеннях цих чинників характеристики надійності та несучої здатності нормальних перерізів вказаних конструкцій прийнятих розмірів утворюють поверхні, які перетинаються при значеннях $\beta_A = 7,61 \dots 8,20$ та $M_{u,A} = 274,08 \dots 295,86$ кНм (рис. 1, г) при використанні стержневої арматури і $\beta_{B^*} = 7,06 \dots 7,98 \dots 6,94$ та $M_{u,B^*} = 324,18 \dots 372,19 \dots 330,63$ кНм (рис. 2, г) при застосуванні дротяної арматури.

References

1. DBN V.2.6-98:2009. Konstruktsii budynkiv i sporud. Betonni ta zalizobetonni konstruktsii. Osnovni polozhennia. K.: Minrehionbud Ukrainy, 2022. 71 s.
2. DSTU B V.2.6-156:2010. Konstruktsii budynkiv i sporud. Betonni ta zalizobetonni konstruktsii z vazhkohto betonu. Pravyla proektuvannia. K.: Minrehionbud Ukrainy, 2011. 118.
3. EN 1992-1-1. Eurocode 2: Desing of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels: CEN, 2004. 225 p.
4. Pichuhin S.F. Rozrakhunok nadiinosti budivelnykh konstruktsii = Reliability Calculation of Buildings Structures: monohrafiia. Poltava: TOV «ASMI», 2016. 520 s.
5. Semko O.V., Voskobiinyk O.P. Keruvannia ryzykamy pry proektuvanni ta ekspluatatsii stalezalizobetonnykh konstruktsii: monohrafiia. Poltava: PolNTU, 2012. 514.
6. Novak A.S., Collins K.R. Reliability of Structures. 2nd ed. CRC Press. 2012. 407 p.
7. Todinov M.T. Reliability and Risk Models: Setting Reliability Requirements. 2nd ed. John Wiley & Sons, 2015. 456 p.
8. Ayyub B.M., McCuen R.H. Probability, Statistics, and Rebiality for Engineers and Scientists. 3rd ed. Boca Ration: CRC Press, 2011. 663 p.

9. Ditlevsen O., Madsen H.O. Structural Reliability Methods: monograph. 2nd ed. Technical University of Denmark, 2007. 361 p.
10. Zastava M.M., Ahaev A.A., Rabotyng Yu.A. Rehulyrovanye raschetnoi nadezhnosti zhelezobetonykh konstruksiyi. Odessa, 1996. 194 s.
11. Klymenko E.V., Karpiuk V.M., Ahaeva O.A. Raschet nadezhnosti proletnykh zhelezobetonykh elementov po prochnosti normalnykh secheniy. Nauka ta budivnytstvo, 2018. №1. S. 50-57.
12. Karpiuk V.M., Ahaeva O.A. Rehulyrovanye raschetnoi nadezhnosti yzghybaemykh predvartelno napriazhennykh zhelezobetonykh elementov po prochnosti normalnykh secheniy. Visn. Odeskoi derzh. akad. bud-va ta arkhitektury. Odessa, 2015. Vyp. 57. S. 171–181.

Список використаної літератури

1. ДБН В.2.6-98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. К.: Мінрегіонбуд України, 2022. 71 с.
2. ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. К.: Мінрегіонбуд України, 2011. 118.
3. EN 1992-1-1. Eurocode 2: Desing of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels: CEN, 2004. 225 p.
4. Пічугін С.Ф. Розрахунок надійності будівельних конструкцій = Reliability Calculation of Buildings Structures: монографія. Полтава: ТОВ «АСМІ», 2016. 520 с.
5. Семко О.В., Воскобійник О.П. Керування ризиками при проектуванні та експлуатації сталезалізобетонних конструкцій: монографія. Полтава: ПолНТУ, 2012. 514.
6. Novak A.S., Collins K.R. Reliability of Structures. 2nd ed. CRC Press. 2012. 407 p.
7. Todinov M.T. Reliability and Risk Models: Setting Reliability Requirements. 2nd ed. John Wiley & Sons, 2015. 456 p.
8. Аyyub B.M., McCuen R.H. Probability, Statistics, and Reliability for Engineers and Scientists. 3rd ed. Boca Ration: CRC Press, 2011. 663 p.
9. Ditlevsen O., Madsen H.O. Structural Reliability Methods: monograph. 2nd ed. Technical University of Denmark, 2007. 361 p.
10. Застава М.М., Агаев А.А., Работин Ю.А. Регулирование расчетной надежности железобетонных конструкций. Одесса, 1996. 194 с.
11. Клименко Е.В., Карпюк В.М., Агаева О.А. Расчет надежности пролетных железобетонных элементов по прочности нормальных сечений. Наука та будівництво, 2018. №1. С. 50-57.
12. Карпюк В.М., Агаева О.А. Регулирование расчетной надежности изгибаемых предварительно напряженных железобетонных элементов по прочности нормальных сечений. Вісн. Одеської держ. акад. буд-ва та архітектури. Одеса, 2015. Вип. 57. С. 171–181.

**ЗЧЕПЛЕННЯ СТРИЖНЕВОЇ АРМАТУРИ КЛАСУ А500С ЗІ
СТАЛЕФІБРОБЕТОНОМ ЗРАЗКІВ БАЛКОВОГО ТИПУ**

**COUPLING STRENGTH OF CLASS A500C ROD REINFORCEMENT
WITH STEEL FIBER CONCRETE OF BEAM TYPE SPECIMENS**

Білозір В.В., к.т.н., доц., Мазурак Р.А., аспірант (Львівський національний університет природокористування)

Bilozir V., PhD, Associate Professor, Mazurak R., postgraduate (Lviv National Environmental University)

Проаналізовано результати експериментів з витягування стрижневої арматури класу А500С зі сталевібробетону елементів балкового типу. Показано, що напруження зчеплення, які відповідають зсувові незавантаженого кінця стрижня 0,1 мм, можна достатньо точно оцінити рівнянням регресії, отриманим за результатами випробування на витягування стрижнів з призматичних зразків та з використанням поправочного коефіцієнта 0,84. При цьому відношення експериментальних і теоретичних напружень знаходиться в межах 0,95 – 1,05.

The coupling of reinforcement with concrete ensures their joint work from the beginning of loading of the structural element until its destruction. It depends on a number of factors that affect the reliability of anchoring rods in reinforced concrete, which must be taken into account when designing structures.

Fiber reinforcement can be considered as a type of indirect reinforcement that affects the bond strength with concrete. In this study, fiber reinforcement with bent ends of the HE1050 type, 50 mm long and 1 mm in diameter, was used.

It is known to use the three-factor design of the Box-Behnken experiment to obtain the regression equation, the function of which is the shear bond strength of the unloaded end of the rod 0.1 mm fb, and the arguments are the parameters affecting these stresses. This experimental plan was also used to study issues of crack resistance of composite reinforced steel fiber concrete stretched elements. In previous studies, we used a full four-factor experiment, and accepted the hypothesis of a linear influence of factors on the coupling stress fb. According to the results of experiments on pulling out rods of class A500C Ø 8 and Ø 12 mm from fiber concrete prisms 150 x 150 x 200 mm, the regression equation was obtained.

In this work, the beam method of tests for pulling out rods from fiber concrete is used. Evaluation of the experimental values of $f_{b,exp}$ proved that the theoretical values of $f_{b,theor}$, are greater than the experimental ones. The ratio of experimental values to theoretical values is within 0,79 – 0,88. Therefore, it is proposed to accept the right-hand side of the regression equation obtained from the results of experiments on pulling rods from prisms with the average value of this ratio of 0.84. This makes it possible to

approximate experimental and theoretical data, and the mentioned ratio will be in the range of 0.95 - 1.05, which can be considered quite satisfactory.

In addition, in order to evaluate the effect of fiber reinforcement on the bond stress f_b , two twin samples were made, which did not contain fibers. Stress f_b of fiber concrete samples exceeded the corresponding stress of concrete by 14-40% depending on $f_{c,prism}$ and ρ_{fv} .

Ключові слова: арматура, серпоподібний профіль, сталеві фібробетон, зчеплення, балка, розрахунок.

Key words: armature, sickle profile, steel fiber concrete, coupling, beam, calculation.

Постановка проблеми. Зчеплення арматури з бетоном забезпечує їх спільну роботу від початку завантаження елемента конструкції аж до його руйнування. Воно залежить від низки факторів, які впливають на надійність анкерування стрижнів у залізобетоні, що потрібно враховувати при проектуванні конструкцій.

Фіброве армування можна розглядати як різновид непрямого армування, який впливає на міцність зчеплення з бетоном [1]. У даному дослідженні використовували фіброву арматуру зі загнутими кінцями типу HE 1050 довжиною 50 мм і діаметром 1 мм українського виробництва.

Найрозповсюдженішими є два способи випробувань стрижнів на витягування з бетону [2, 3]. Перший спосіб полягає у тому, що стрижень витягують з призми, а згідно з другим способом стрижень витягують з розтягнутої зони балки. Перший спосіб випробувань є менш трудомістким, однак другий спосіб ліпше моделює роботу стрижня у балкових елементах. Тому порівняння результатів випробувань, отриманих обома способами є важливим.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Експериментально-теоретичними дослідженнями зчеплення арматурних стрижнів з бетоном займалося багато як вітчизняних, так і зарубіжних дослідників. Сюди належать дослідження Бабича В. Є., Бабича Є. М., Гвоздева О. О., Климова Ю. А., Мадатяна С. А., Муліна М. М., Оатула О. О., Овчиннікової М. Г., Полянської О. С., Семченкової О. С., Холмянського М. М., Чапюка О. С., Bigai A. J., Darwin D., Eligehausen R., Gambarova P. G., Martin H., Mayer U., Muller H. H., Rehm G. та інших.

Аналіз зарубіжних досліджень, поданий у праці [4], засвідчив, що на значення дотичних напружень за витягування сталевих арматурних стрижнів зі сталеві фібробетону впливають міцність бетону-матриці, об'ємний вміст фібри, її довжина, відношення довжини фібри до її діаметра, діаметр стрижневої арматури, відношення товщини захисного шару бетону до діаметра стрижня. У цій же праці окреслено коло питань,

які торкаються зчеплення стрижнів з фібробетоном, які потрібно вивчити. Особливо це стосується зчеплення стрижневої арматури класу А500С з фібробетоном на фібрі українського виробництва типу HE1050.

Відомим є використання трифакторного плану експерименту Бокса - Бенкена для отримання рівняння регресії, функцією якого є міцність зчеплення за зсуву незавантаженого кінця стрижня 0,1 мм f_b , а аргументами – параметри, що впливають на ці напруження [5, 6]. Цей план експерименту використано також за вивчення питань тріщиностійкості комбіновано армованих сталеві фібробетонних розтягнутих елементів [7]. Особливістю цього плану експерименту є те, що він передбачає три рівні варіювання факторів, одним з яких є призма міцність бетону. Експериментально отримати точно міцність бетону для нульового рівня варіювання є складно, тому нами використаний повний чотирифакторний експеримент [8] за відомою апробованою методикою [9].

Постановка завдання. Завданням даних досліджень є оцінювання впливу фібрового армування на міцність зчеплення f_b стрижнів з фібробетоном, розроблення пропозицій щодо розрахунку міцності зчеплення f_b стрижневої арматури зі сталеві фібробетоном на основі результатів власних експериментальних досліджень.

Виклад основного матеріалу. Методика досліджень, подана у праці [8], передбачала використання повного факторного експерименту (ПФЕ 2⁴) для подальшого отримання рівняння регресії функції f_b . За фактори прийнято призмову міцність бетону $f_{cm,prism}$, відносну довжину закладання стрижня у фібробетон l_b/\varnothing , коефіцієнт фібрового армування за об'ємом ρ_{fv} і діаметр стрижнів \varnothing . Випробування проводилися за методикою [3], яка передбачає витягування стрижнів з призматичних зразків розмірами 150 x 150 x 200 мм. Як виявилось, рівняння регресії ПФЕ 2⁴ є адекватним і має вигляд [8]:

$$f_b = 10,2 + 1,45 \frac{f_{cm,prism} - 30,41}{4,34} + 0,97 \frac{\rho_{fv} - 0,0125}{0,0055} + 0,16 \frac{\varnothing - 10}{2} + 0,14 \left(\frac{f_{cm,prism} - 30,41}{4,34} \right) \left(\frac{\rho_{fv} - 0,0125}{0,0055} \right) \quad (1)$$

У праці [8] подано також рівняння регресії для визначення нормальних напружень в стрижнях за зсуву незавантаженого кінця стрижня 0,1 мм.

На випадок, якщо б рівняння регресії ПФЕ 2⁴ незадовільно оцінювало експериментальні результати, виготовлено і випробувано додаткові зразки

для побудови плану експерименту, близького до оптимального (D4). Для кожної точки експерименту випробувано по три зразки-близнюки.

Результати випробувань вказаних додаткових зразків оцінювали, використовуючи формулу (1). Відношення експериментальних значень до теоретичних знаходиться в межах 1,01 – 1,05 (Таблиця 1).

Таблиця 1

Експериментальні і теоретичні значення нормальних напружень в арматурі за зсуву незавантаженого кінця стрижня 0,1 мм

Марки зразків*	Середнє значення дотичних напружень при зсуві 0,1 мм f_b , МПа	Теоретичні значення дотичних напружень в арматурі при зсуві 0,1 мм $f_{b,theor}$, МПа	$\frac{f_b}{f_{b,theor}}$
1.2PF10.100	8,79	8,75	1,005
2.1PF10.100	9,87	9,41	1,049
2.2PF8.80	10,38	9,87	1,052
2.2PF10.80	11,52	11,01	1,046
2.2PF10.120	9,63	9,26	1,040
2.2PF12.120	10,26	10,05	1,021
2.3PF10.100	11,34	10,78	1,052
3.2PF10.100	11,60	11,07	1,048

* – У маркуванні зразків: перша цифра – клас бетону (1 – C20/25, 2 – C25/30, 3 – C30/35); друга цифра – коефіцієнт ρ_{fv} (1 – 0,007, 2 – 0,125, 3 – 0,18); PF – призма фібробетонна; перше число після PF – діаметр стрижня, мм; друге число – довжина закладання стрижня у фібробетон, мм. У таблиці подано маркування для трьох зразків-близнюків.

Для порівняння з даними призмовими зразками були виготовлені і випробувані зразки, які не містили фібри. Порівняння напружень f_b за зсуву незавантаженого кінця стрижня 0,1 мм для фібробетонних і сталевібробетонних призм подано в таблиці 2.

Таблиця 2

Порівняння напружень f_b за зсуву незавантаженого кінця стрижня 0,1 мм для фібробетонних і бетонних призм

Марки фібробетонних зразків*	Середнє значення дотичних напружень при зсуві 0,1 мм f_b , МПа	Марки бетонних зразків	Середнє значення дотичних напружень при зсуві 0,1 мм f_b , МПа	Відношення f_b фібробетонних зразків до бетонних
1.2PF10.100	8,79	1.0P10.100	7,64	1,15
2.1PF10.100	9,87	2.0P10.100	8,19	1,21
2.2PF8.80	10,38	2.0P8.80	7,44	1,40
2.2PF10.80	11,52	2.0P10.80	8,23	1,40
2.2PF10.120	9,63	2.0P10.120	7,79	1,24
2.2PF12.120	10,26	2.0P12.120	7,60	1,35
2.3PF10.100	11,34	2.0P10.100	8,19	1,38
3.2PF10.100	11,60	3.0P10.100	9,36	1,24

Для оцінювання різниці між міцністю зчеплення f_b зразків, поданих в таблиці 1, призмового і балкового типу були виготовлені і випробувані фібробетонні і бетонні балки за методикою [2] (Рис.1). Балки мали поперечний переріз 120 x 220 мм, склалися з двох ділянок довжиною 600 мм і містили по одному стрижню з відстанню від його центру до центру шарніра 135 мм. Відстань від нижньої грані до центру стрижня дорівнювала 60 мм. Балка під час випробувань показана на рис. 2. Робочий проліт балки дорівнював 860 мм, а відстань між зосередженими силами, прикладеними до балки, – 400 мм. Виготовляли і випробовували по два зразки-близнюки балок.

За значеннями зовнішніх згинальних моментів отримували витягуюче зусилля, прикладене до арматури, нормальні напруження в стрижнях,

дотичні напруження між стрижнем і фібробетоном балки. Характерна залежність зміщення незавантаженого кінця стрижня від зусилля у стрижні подана на рис. 3.

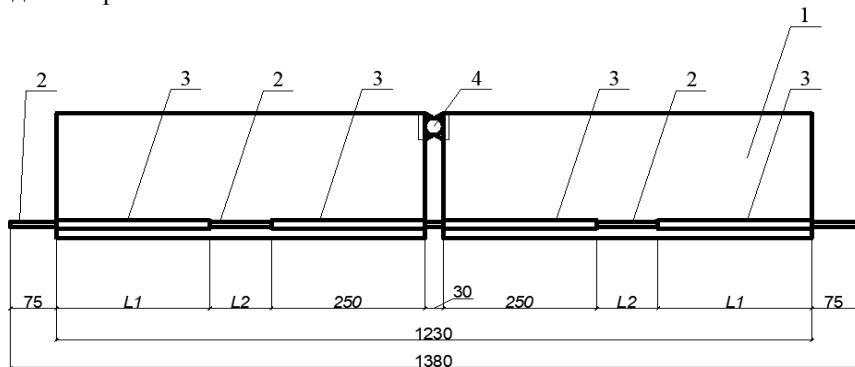


Рис. 1. Конструкція балочних зразків

1- балка; 2-арматура; 3-полімерний трубний ущільнювач; 4-шарнір



Рис 2. Балка під час випробувань

Результати випробувань зразків балкового типу подані в таблиці 3. Оцінювання експериментальних значень $f_{b,exp}$ засвідчило, що теоретичні значення $f_{b,theor}$, обчислені за формулою (1), є більшими за експериментальні. Відношення експериментальних значень до теоретичних знаходиться в межах 0,79 – 0,88. Тому пропонується праву

частину рівняння (1) приймати зі середнім значенням цього відношення ($k_m=0,84$). Це дозволяє зблизити експериментальні і теретичні дані, і згадане відношення знаходитиметься в межах 0,95 – 1,05, що можна вважати цілком задовільним.

Таблиця 3

Результати випробувань дослідних зразків за балковим методом [6]

Марки балкових фібробетонних зразків*	$f_{c,prism}$ МПа	$f_{b,exp}$ МПа	$f_{b,theor}$ МПа	$k = \frac{f_{b,exp}}{f_{b,theor}}$	k_m	$f_{b,theor,m}$ МПа	$f_{b,exp}$ $f_{b,theor,m}$
1.2BF10.100	26,07	7,33	8,75	0,84	0,84	7,35	0,99
2.1BF10.100	29,14	7,8	9,41	0,88		7,43	1,05
2.2BF8.80	29,14	8,51	9,87	0,88		8,08	1,05
2.2BF10.80	29,14	8,74	11,01	0,80		8,08	0,96
2.2BF10.120	29,14	7,77	9,26	0,79		8,22	0,95
2.2BF12.120	29,14	8,41	10,05	0,85		8,35	1,01
2.3BF10.100	29,14	9,45	10,78	0,88		9,00	1,05
3.2BF10.100	34,75	9,59	11,07	0,82		9,79	0,98

* BF – балка фібробетонна. У таблиці подано маркування для двох зразків-близнюків.



Рис.3. Залежність зміщення незавантаженого кінця стрижня від витягуючого зусилля для балок 1.2BF10.100 і 1.2BF10.100

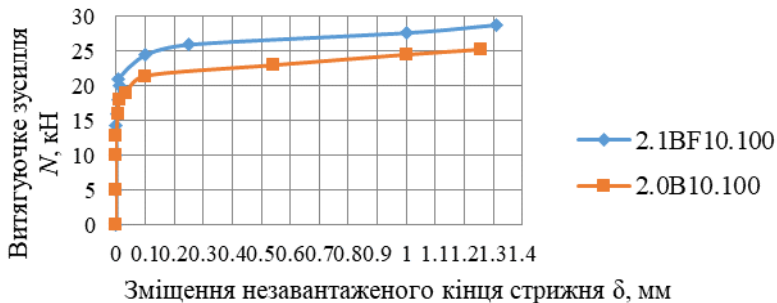


Рис.4. Залежність зміщення незавантаженого кінця стрижня від витягуючого зусилля для балок 2.1BF10.100 і 2.0 B10.100

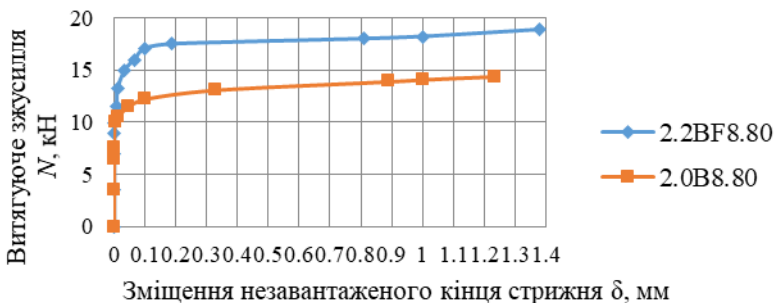


Рис.5. Залежність зміщення незавантаженого кінця стрижня від витягуючого зусилля для балок 2.2BF8.80 і 2.0 B8.80

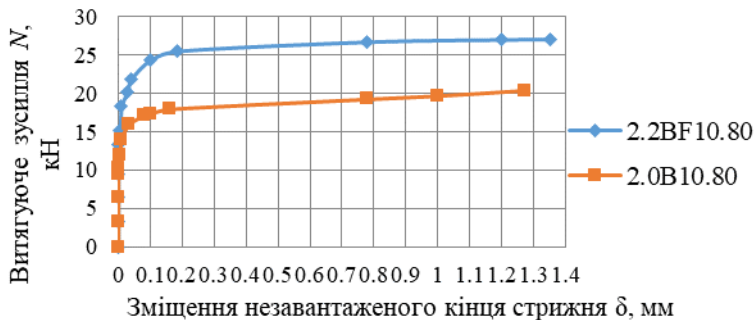


Рис.6. Залежність зміщення незавантаженого кінця стрижня від витягуючого зусилля для балок 2.2BF10.80 і 2.0 B10.80

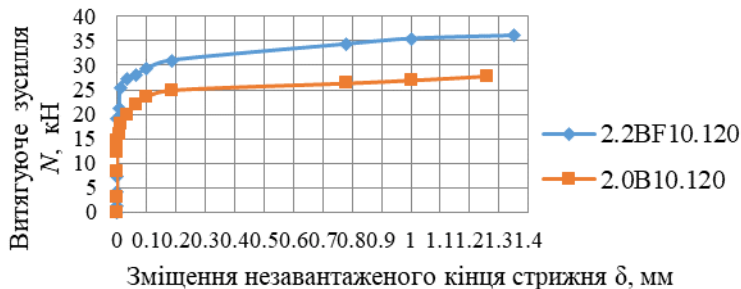


Рис.7. Залежність зміщення незавантаженого кінця стрижня від витягуючого зусилля для балок 2.2BF10.120 і 2.0 B10.120

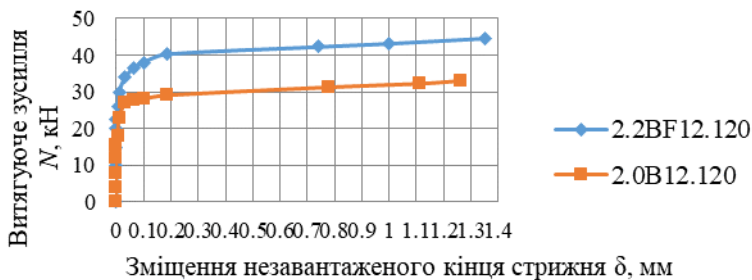


Рис.8. Залежність зміщення незавантаженого кінця стрижня від витягуючого зусилля для балок 2.2BF12.120 і 2.0 B12.120

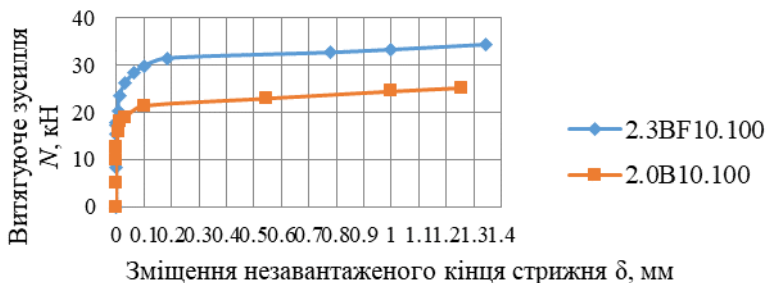


Рис.9. Залежність зміщення незавантаженого кінця стрижня від витягуючого зусилля для балок 2.3BF10.100 і 2.0 B10.100

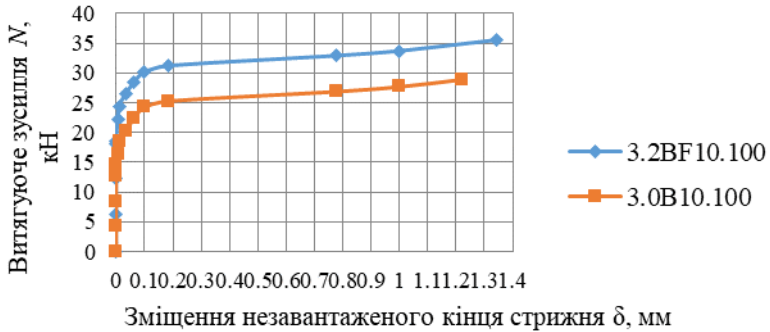


Рис.10. Залежність зміщення незавантаженого кінця стрижня від витягуючого зусилля для балок 3.2BF10.100 і 3.0 B10.100

Таким чином, f_b для балкових елементів можна обчислити за формулою:

$$f_b = 0,84 \left[10,2 + 1,45 \frac{f_{cm,prism} - 30,41}{4,34} + 0,97 \frac{\rho_{fv} - 0,0125}{0,0055} + 0,16 \frac{\phi - 10}{2} + 0,14 \left(\frac{f_{cm,prism} - 30,41}{4,34} \right) \left(\frac{\rho_{fv} - 0,0125}{0,0055} \right) \right] \quad (2)$$

Крім цього, для оцінювання впливу фібрового армування на напруження зчеплення f_b були виготовлені по два зразки-близнюки, які не містили фібри. Напруження f_b фібробетонних зразків перевищували відповідні напруження бетонних на 12 – 40% залежно від $f_{c,prism}$ і ρ_{fv} (Таблиця 4).

Висновки

1. Міцність зчеплення f_b стрижневої арматури зі сталевіфробетоном призових зразків добре описується рівнянням регресії (1) і є більшою у порівнянні зі зразками, які не містили фібри, в 1,15 – 1,4 рази.
2. Відношення міцності зчеплення стрижнів із фібробетоном балкових зразків f_b до теоретичної у призових зразках, обчисленої за формулою (1), в середньому дорівнює 0,84. Тому праву частину формули (1) рекомендується множити на коефіцієнт, що дорівнює цьому відношенню (формула (2)).

Таблиця 4

Порівняння напружень f_b за зсуву незавантаженого кінця стрижня 0,1 мм для сталевібробетонних і бетонних балок

Марки фібробетонних зразків	Середнє значення дотичних напружень при зсуві 0,1 мм f_b , МПа	Марки бетонних зразків	Середнє значення дотичних напружень при зсуві 0,1 мм f_b , МПа	Відношення f_b фібробетонних зразків до бетонних
1.2BF10.100	7,33	1.2B10.100	6,4	1,15
2.1BF10.100	7,8	2.1B10.100	6,83	1,14
2.2BF8.80	8,51	2.2B8.80	6,1	1,40
2.2BF10.80	7,74	2.2B10.80	6,92	1,12
2.2BF10.120	7,77	2.2B10.120	6,28	1,24
2.2BF12.120	8,41	2.2B12.120	6,23	1,35
2.3BF10.100	9,45	2.3B10.100	6,83	1,38
3.2BF10.100	9,59	3.2B10.100	7,74	1,24

References

1. Bilozir V. V., Mazurak R. A. Analiz chynnykiv, shcho vplyvaiut na zchepлення armatury serpopodobnogo profilu z betonom i fibrobetonom. Suchasni tekhnologii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi. 2020. Vyp. 14. S. 47- 54.
2. TC R. RC 5 Bond test for reinforcement steel. 1. Beam test, 1982. RILEM Recommendations for the Testing and Use of Constructions Materials. New York, USA: E & FN SPON, 1978. P. 213 – 217.
3. TC R. RC 6 Bond test for reinforcement steel. 2. Pull-out test, 1983. RILEM Recommendations for the Testing and Use of Constructions Materials. New York, USA: E & FN SPON, 1994. P. 218 – 220.
4. Mazurak R. Ohliad doslidzhen ankeruvannia armaturnykh stryzhniv u stalefibrobetoni. Visnyk Lvivskoho natsionalnoho aharnoho universytetu. Ser. Arkhitektura i silskohospodarske budivnytstvo. 2021. № 22. S. 47 – 53.

5. Babych Ye. M., Babych V. Ye., Polianovska O. Ye. Zcheplennia z betonom armatury serpopodobnogo profilu ta yii ankeruvannia v zghynalnykh zalizobetonnykh elementakh: monohrafiia. Rivne: Volynski oberehy, 2017. 160 s.

6. Babych Ye. M., Kochkarov D. V., Filipchuk S. V. Matematychna model zcheplennia armatury z vysokomitsnym betonom. Budivelnii konstruktсии. Teoriia i praktyka: zb. nauk. prats. Kyiv: KNUBA, 2018. Vyp. 2. S. 154 – 161.

7. Andriichuk O. V., Babych V. Ye., Polianovska O. Ye., Shvets I. V. Trishchynostiikist tsentralno rozhtiahnutykh kombinovano armovanykh zalizobetonnykh elementiv. Suchasni tekhnolohii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi. 2020. Vyp. 14. S. 13- 25.

8. Dvorkin L. Y., Dvorkin O. L., Zhytkovskyi V. V. Rozviazuvannia budivelnno-tekhnolohichnykh zadach metodamy matematychnoho planuvannia eksperymentu: Navch. posibnyk. Rivne: NUVHP, 2011. 174 s.

9. Bilozir V. V., Mazurak R. A. Matematychna model zcheplennia stryzhnevoi armatury zi stalefibrobetonom. Resursoekonomni materialy, konstruktсии, budivli ta sporudy. 2022. Vyp. 41. S. 103- 109.

Список використаної літератури

1. Білозір В. В., Мазурак Р. А. Аналіз чинників, що впливають на зчеплення арматури серпоподібного профілю з бетоном і фібробетоном. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2020. Вип. 14. С. 47- 54.

2. TC R. RC 5 Bond test for reinforcement steel. 1. Beam test, 1982. *RILEM Recommendations for the Testing and Use of Constructions Materials*. New York, USA: E & FN SPON, 1978. P. 213 – 217.

3. TC R. RC 6 Bond test for reinforcement steel. 2. Pull-out test, 1983. *RILEM Recommendations for the Testing and Use of Constructions Materials*. New York, USA: E & FN SPON, 1994. P. 218 – 220.

4. Мазурак Р. Огляд досліджень анкерування арматурних стрижнів у staleфіробетоні. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Сер. Архітектура і сільськогосподарське будівництво*. 2021. № 22. С. 47 – 53.

5. Бабич Є. М., Бабич В. Є., Полянська О. Є. Зчеплення з бетоном арматури серпоподібного профілю та її анкерування в згинальних залізобетонних елементах: монографія. Рівне: Волинські обереги, 2017. 160 с.

6. Бабич Є. М., Кочкар'єв Д. В., Філіпчук С. В. Математична модель зчеплення арматури з високоміцним бетоном. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*: зб. наук. праць. Київ: КНУБА, 2018. Вип. 2. С. 154 – 161.

7. Андрійчук О. В., Бабич В. Є., Полянська О. Є., Швець І. В. Тріщиностійкість центрально розтягнутих комбіновано армованих залізобетонних елементів. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2020. Вип. 14. С. 13- 25.

8. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Житковський В. В. Розв'язування будівельно-технологічних задач методами математичного планування експерименту: Навч. посібник. Рівне: НУВГП, 2011. 174 с.

9. Білозір В. В., Мазурак Р. А. Математична модель зчеплення стрижневої арматури зі staleфіробетоном. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2022. Вип. 41. С. 103- 109.

**МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОПРУЖНОГО
СТАНУ ТРИШАРОВОЇ СКЛАДЕНОЇ ОБОЛОНКИ**

**SIMULATION AND RESEARCH OF THERMO ELASTIC STATE OF A
THREE-LAYER COMPOUND SHELL**

Бондарський О.Г., к.т.н., доц., Ужегова О.А., к.т.н., доц. (Луцький національний технічний університет)

Bondarskyi O.G., Ph.D. in Engineering, associate professor, Uzhehova O.A., PhD in Engineering, Associate Professor (Lutsk National Technical University)

Отримані результати розрахунків за класичною та уточненою теоріями для оболонкової системи при різних граничних умовах.

The emergence and development of cities were accompanied by Technical progress in the fields of construction, architecture, and urban planning encouraging architects, designers, and other engineering specialists to use new, modern, and effective materials and structures in their activities. It is important to solve the problem of creating structures from elements that have low material consumption, the required indicators of strength, reliability, durability, and high manufacturability. The solution to this problem lies in the improvement of general structural schemes of buildings and their calculation methods, in the development of effective structural elements, and the use of new, including high-strength, materials. Such modern constructions include multi-layer shells and plates made of composite materials. A peculiarity of the calculation of multilayer structures from composite materials is that the assumptions about the straight normal and plane sections and the classical theory built based on these hypotheses cannot be applied, because it leads to significant errors in the results. In this article, the finite-shear model of shell theory is used in the calculation of thin-walled multilayer structures in combination with modern numerical methods. The purpose of this article is to simulate the operation of multilayer shells and plates that work under the influence of force and temperature influences. The effect of transverse shear deformation on the thermoelastic equilibrium of the shell system "cylinder-cone" is investigated.

Some peculiarities in the work of the multilayer structure were revealed by comparing the solutions obtained according to the refined model and within the framework of the Kirchhoff-Leav hypotheses. The shell was calculated with different options for fixing the ends:

- 1) articulated-movable support at $x=0$ and clamping at $x=L$;*
- 2) a free edge at $x=0$ and pinching at $x=L$;*
- 3) articulated-moving support at $x=0$ and articulated-fixed at $x=L$;*
- 4) clamping at $x=0$ and $x=L$;*
- 5) hinged and stationary support at $x=0$ and clamping at $x=L$;*

b) hinged-fixed support with an absolutely rigid out-of-plane diaphragm at the end at $x=0$ and $x=L$.

Ключові слова: багатошарові оболонки і пластини, кінцево-зсувна модель теорії оболонок.

Keywords: multilayer shells and plates, finite-displacement model of shell theory.

Вступ. Технічний прогрес в галузях будівництва, архітектури та містобудування спонукає архітекторів, конструкторів та інших фахівців інженерного спрямування до застосування в своїй діяльності нових, сучасних та ефективних матеріалів та конструкцій. Важливим є розв'язок задачі створення споруд із елементів, які володіють низькою матеріалоемністю, потрібними показниками міцності, надійності, довговічності та високою технологічністю. Розв'язок такої задачі полягає в удосконаленні загальних конструкційних схем споруд і методів їх розрахунку, в розробці ефективних елементів конструкцій і застосування нових, в тому числі і високоміцних матеріалів. Такими сучасними конструкціями слугують багатошарові оболонки і пластини, які виготовлені із композиційних матеріалів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Постановка проблеми

Особливістю розрахунку багатошарових конструкцій із композитних матеріалів є те, що припущення щодо прямих нормалей та плоских перерізів і побудована на основі цих гіпотез класична теорія не може бути застосована, адже приводить до суттєвих похибок у результатах.

Для розрахунку таких конструкцій поряд з тривимірними розв'язками [1] широко використовують наближені двовимірні теорії які враховують анізотропію властивостей, низьку зсувну жорсткість та істотну залежність термомеханічних характеристик від температури нагріву [2]. Такі уточнені теорії відрізняються між собою різною точністю і областями застосування [3].

Дослідження термонапруженого стану багатошарових ортотропних оболонок і пластин може бути виконано за допомогою підходу [4], який ґрунтується на розв'язку рівнянь теорії пружності. Але такий підхід можливий тільки для оболонок канонічної форми і при певних граничних умовах.

В даній статті при розрахунку тонкостінних багатошарових конструкцій використовується кінцево-зсувна модель теорії оболонок [3,5,6] в поєднанні з сучасними числовими методами.

Мета цієї статті полягає у моделюванні роботи багатошарових оболонок і пластин, які працюють під дією силових і температурних

впливів. Досліджується вплив деформації поперечного зсуву на термопружну рівновагу оболонкової системи "циліндр-конус".

Основна частина. Розглядається складена оболонка, яка уявляє собою сукупність циліндричної і конічної оболонок обертання, які працюють як одне ціле (рис.1)

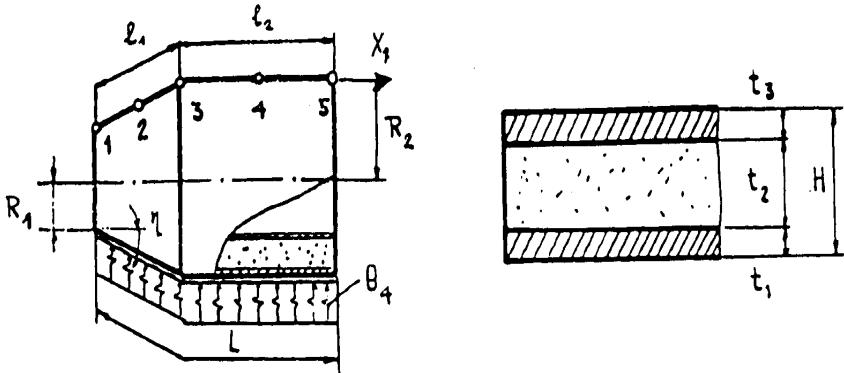


Рис 1. Конструктивна схема оболонки

Оболонка знаходиться в умовах конвективного теплообміну з оточуючим середовищем, температура якого задана виразами:

$$\Theta_1 = \Theta_2 = \Theta_3 = 20^\circ\text{C}; \quad \Theta_4 = 100^\circ\text{C}.$$

До зовнішньої поверхні оболонки прикладений тиск $q=0,03$ МПа. Геометричні розміри оболонки наступні: довжина конічної частини $L_1=0,24$ м, циліндричної – $L_2=0,19$ м; початковий радіус конічної частини $R_1=0,1$ м, циліндричної – $0,2$ м; товщина несучих шарів $t_1 = t_2=t_H=0,001$ м, заповнювача – $t_2=t_{ЗАП}=0,012$ м. Коефіцієнти тепловіддачі з нижньої, верхньої і торцевих поверхонь відповідно рівні $a_3=a_4=1500$ Вт/(м²·К), $a_1=a_2=200$ Вт/(м²·К). Матеріал шарів володіє такими характеристиками: модулі пружності $E_H=7 \cdot 10^4$ МПа, $E_{ЗАП}=70$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\nu_H=0,3$; $\nu_{ЗАП}=0,1$; коефіцієнти теплопровідності $\lambda_H=100$ Вт/(м·К), $\lambda_{ЗАП}=100$ Вт/(м·К); коефіцієнти лінійного теплового розширення $\alpha_H=0,238 \cdot 10^{-4}$ 1/К, $\alpha_{ЗАП}=0$.

Оболонка розраховувалася при різних варіантах закріплення торців:

- 1) шарнірно-рухоме спирання при $x=0$ і защемлення при $x=L$;
- 2) вільний край при $x=0$ і защемлення при $x=L$;

- 3) шарнірно-рухоме спирання при $x=0$ і шарнірно-нерухоме при $x=L$;
- 4) защемлення при $x=0$ і $x=L$;
- 5) шарнірно-нерухоме спирання при $x=0$ і защемлення при $x=L$;
- 6) шарнірно-нерухоме спирання з абсолютно жорсткою із своєї площини діафрагмою на торці при $x=0$ і $x=L$.

Виявимо деякі особливості в роботі багатошарової конструкції шляхом порівняння розв'язків, які отримані за уточненою моделлю [6] і в рамках гіпотез Кірхгофа-Лява. Розрахунки проводилися для тонкої оболонки. Результати розв'язку задачі при різних граничних умовах наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Результати розрахунку оболонки

Величини, що порівнюю ться	$x = \frac{L_1}{2}$		$x = L_1$		$x = L_1 + \frac{3}{4}L_2$	
	Класич.	Уточн.	Класич.	Уточн.	Класич.	Уточн.
1	2	3	4	5	6	7
1) шарнірно-рухоме спирання ($x = 0$) і защемлення ($x = L$)						
$u_z \cdot 10^4$	2,26	2,29	2,93	2,75	2,31	3,02
σ_{11}^-	97,5	91,0	103	118	72,9	94,3
σ_{11}^+	-94,8	-88,7	-97,9	-113	-67,9	-89,2
σ_{22}^-	102	102	99,9	98,3	69,5	101
σ_{22}^+	-89,2	-82,3	-93,6	-104	-106	-87,7
3) шарнірне спирання торців						
$u_z \cdot 10^4$	2,26	2,29	2,92	2,76	3,58	3,53
σ_{11}^-	97,6	90,7	102	112	68,8	53,8
σ_{11}^+	-94,8	-88,4	-97,4	-119	-63,6	-48,8
σ_{22}^-	102	102	99,6	98,2	113	99,4
σ_{22}^+	-89,6	-86,6	-93,5	-103	-60,3	-64,7

4) защемлення торців						
$u_z \cdot 10^4$	2,70	2,62	5,31	6,82	2,59	3,33
σ_{11}^-	26,2	41,65	-23,9	-16,5	20,6	56,6
σ_{11}^+	-166	-150	-67,9	-95,1	-112	-127
σ_{22}^-	101	102	145	156	63,7	100
σ_{22}^+	-90,5	-89,6	-13,7	-10,1	-109	-88,8

Як видно із наведених результатів, переміщення і напруження отримані за класичною і уточненою теоріями для першого типу граничних умов близькі між собою. Виняток становлять напруження поруч защемленого торця оболонки, де розбіжність у результатах досягає 50%. Для шарнірно-спертої оболонки (третій тип граничних умов) характерний близький збіг результатів у всіх перерізах. У випадку защемлення торців розв'язок в рамках гіпотез Кірхгофа-Лява суттєво відрізняється від уточненого в зоні з'єднання циліндричної і кінцевої частин оболонки, а також в зоні торця. Результати розрахунку для другого, п'ятого і шостого типів граничних умов якісно відповідають розв'язкам, які наведені в таблиці 1 для першого, третього і четвертого варіантів спірання торців оболонки.

References

1. Hryhorenko Ya.M., Vasylenko A.T., Pankratova N.D. Do rozv'iazku napruzhenoho stanu товстостінних неоднорідних оболонок. – *Prykl. mekhanika*, 1974, T.10, №5, S. 86-93.
2. Bondarskyi O.H., Babkov O.V. Vplyv termochutlyvosti materialu шарів на napruzhenno-deformovanyi stan bahatosharovykh оболонок і пластин // *Suchasni tekhnolohii ta metody rozrakhunkiv v budivnytstvi: Zb. nauk. prats* – Lutsk: Lutskiy NTU, 2021. Vyp. 16. S. 20-25.
3. Rasskazov O.O., Sokolovska I.I., Shulha M.A. Teoriia i rozrakhunok шаруватих ортотропних пластин і оболонок. Kyiv: Vyshcha shkola. 1986. 191 s.
4. Hryhorenko Ya.M., Vasylenko A.T., Pankratova N.D. Statyka anizotropnykh tonkostinnykh оболонок. Kyiv: Vyshcha shkola. 1985. 189 s.
5. Bondarskyi O.H., Babkov O.V., Kosenko V.I. Metodyka chyselnoho rozv'iazannia kraiovykh zadach statyky system bahatosharovoi struktury. // *Mizhvuzivskyi zbirnyk "Naukovi notatky"*. Vypusk №33. 2011. S. 50–52.

6. Pankratova N.D., Rasskazov O.O., Bondar O.H., Bondarskyi O.H. Do rozv'язku termopapruzhenoho stanu piddatlyvykh na zsuв bahatosharovykh ortotropnykh obolonok i plastyn // Prykl. mekhanika, 1987. T.23, № 7. S. 55-61.

Список використаної літератури

1. Григоренко Я.М., Василенко А.Т., Панкратова Н.Д. До розв'язку напруженого стану товстостінних неоднорідних оболонок. – Прикл. механіка, 1974, Т.10, №5, С. 86-93.

2. Бондарський О.Г., Бабков О.В. Вплив термочутливості матеріалу шарів на напружено-деформований стан багат шарових оболонок і пластин // Сучасні технології та методи розрахунків в будівництві: Зб. наук. праць – Луцьк: Луцький НТУ, 2021. Вип. 16. С. 20-25.

3. Рассказов О.О., Соколовська І.І., Шульга М.А. Теорія і розрахунок шаруватих ортотропних пластин і оболонок. Київ: Вища школа. 1986. 191 с.

4. Григоренко Я.М., Василенко А.Т., Панкратова Н.Д. Статика анізотропних тонкостінних оболонок. Київ: Вища школа. 1985. 189 с.

5. Бондарський О.Г, Бабков О.В., Косенко В.І. Методика чисельного розв'язання крайових задач статки систем багат шарової структури. // Міжвузівський збірник "Наукові нотатки". Випуск №33. 2011. С. 50–52.

6. Панкратова Н.Д., Рассказов О.О., Бондар О.Г., Бондарський О.Г. До розв'язку термонапруженого стану піддатливих на зсув багат шарових ортотропних оболонок і пластин // Прикл. механіка, 1987. Т.23, № 7. С. 55-61.

**ВИКОРИСТАННЯ МОРФОЛОГІЧНОГО ПІДХОДУ ПРИ РОЗРОБЦІ
КОНЦЕПЦІЇ РОЗВИТКУ ІСТОРИЧНОЇ ЧАСТИНИ М. ЛУЦЬКА**

**USE OF THE MORPHOLOGICAL APPROACH IN THE
DEVELOPMENT OF THE DEVELOPMENT CONCEPT OF THE
HISTORICAL PART M. LUTSK**

**Верешко О.В., старший викладач, Мельник Ю.А., к.т.н., доцент,
(Луцький національний технічний університет), Гомон С.С., д.т.н.,
доцент (Національний університет водного господарства та
природокористування, м. Рівне)**

**Vereshko O.V., senior lecturer, Melnyk Yu.A., Ph.D., associate
professor, (Lutsk National Technical University), Homon S.S., Ph.D.,
associate professor (National University of Water economy and nature
management, Rivne)**

*Проаналізовано суть морфологічного підходу, що застосовується при розробці
концепції розвитку міста. На прикладі історичної частини м. Луцька розроблено
схему морфологічних шарів на основі проектно-дослідницького методу англійської
школи «міської морфології» - Urban Morphology.*

*The concept of the development of the historical part of Lutsk should simultaneously
perform many functions, namely, reflect the strategic vision of the development of the
main spheres of life in the center of Lutsk, inform and explain to the city residents the
essence and logic of communal and private projects that can be implemented within the
historical part of the city, help local self-government bodies to adopt effective decisions
in the field of planning and use of public finances.*

*The main goal of this study is to reveal the essence of the use of the morphological
approach in the development of the concept of the development of the historical part of
the city of Lutsk. Tasks: to reveal the essence of the morphological approach used in the
development of the concept; to analyze the possibilities of its application on the example
of the city of Lutsk; to determine the possible positive aspects of the use of the
morphological approach in the development of the concept.*

*The project-analytical method of the English school of "urban morphology" - Urban
Morphology - was used to identify the material heritage and subsequent inventory.*

*With the help of this method, we were able to capture important aspects of the
territory and understand what we have of value, and how to give it the right development
vector. The essence of the method is that the city is perceived as an imaginary layering of
important city-forming forms into layers, which in urban planning theory are called
morphological layers of the city. As part of the conducted research, we have developed a
scheme of morphological layers of the historical part of the city of Lutsk. Such
morphological layers are: buildings, streets, green areas, relief and water areas.*

This method is a good tool for designing a holistic strategic vision for the development of the urban area. With the help of a morphological approach, we expand the focus of attention, where the building occupies only one of the five important layers, and try to change the perception of historical heritage as the value of individual objects of cultural heritage and ordinary buildings.

Ключові слова: морфологічний підхід, історична частина міста, концепція розвитку міста.

Keywords: morphological approach, historical part of the city, concept of city development.

Постановка проблеми

Концепція розвитку міста або його окремої частини пояснює можливість «розв'язання важливих завдань міського розвитку на основі дотримання та реалізації принципів забезпечення територіальної цілісності шляхом більш збалансованого соціального та економічного розвитку регіонів та підвищення їх конкурентоздатності; стимулювання розвитку, спричиненого виконанням міських функцій та поліпшенням взаємовідносин міста й села; сприяння більш збалансованій транспортній доступності; розширення доступу до інформації та знань; зменшення збитків, завданих навколишньому середовищу; підвищення цінності та захист природних ресурсів і природної спадщини; примноження культурної спадщини як фактору розвитку європейських міст; розроблення енергетичних ресурсів та забезпечення енергетичної безпеки; заохочення високоякісного сталого туризму; обмеження впливу природних катастроф тощо» [1, 2].

Концепція розвитку історичної частини Луцька має виконувати багато функцій одночасно. Тобто вона має відображати стратегічне бачення розвитку різних сфер в центральній частині Луцька. Концепція повинна інформувати мешканців міста та пояснювати їм суть приватних та комунальних проєктів, що реалізуються чи можуть реалізуватися в межах досліджуваної території. Концепція повинна допомагати приймати правильні та ефективні рішення у сфері міського планування та використання фінансових надходжень.

Аналіз відомих досліджень і публікацій. Головною передумовою розробки інтегрованої концепції міського розвитку є проєкт «Інтегрований розвиток міст в Україні», підтриманий німецькими та швейцарськими колегами, який реалізовується у 6 містах України, таких як Київ, Львів, Чернівці, Житомир, Полтава та Вінниця. Цей проєкт підтримує одне з основних завдань – децентралізацію [3-5].

Окрім того, окремі питання щодо розробки пропозицій перепланування простору на основі аналізу території, реконструкції території та аналізу принципів благоустрою історичної частини м. Луцька були розглянуті у працях [6-8].

Формулювання цілей статті, постановка завдання. Головна мета даного дослідження полягає в розкритті суті використання морфологічного підходу при розробці концепції розвитку історичної частини м. Луцька. Поставлені завдання: розкрити суть морфологічного підходу, що використовується при розробці концепції; проаналізувати можливості його застосування на прикладі м. Луцька; визначити можливі позитивні сторони застосування морфологічного підходу при розробці концепції.

Виклад основного матеріалу дослідження.

У рамках роботи з формування бачення розвитку території та виконання поставленого завдання застосовувалися методи документування матеріальної та нематеріальної міської спадщини. Міста, як і живі істоти, мають обличчя та душі. І це не лише літературна метафора, а й здавна проголошений та застосовуваний метод дослідження, все, що в ньому міститься, зберегло душу міста, його зміст та символи.

Нематеріальна міська спадщина чи міська метафізика вивчається соціологією, культурологією та антропологією. Обличчя та образ міста втілюється у фізичних аспектах міської спадщини. Фізична чи матеріальна спадщина вивчається міською морфологією. Обидва методологічні напрями можуть лягти в основу дослідження історичної частини Луцька.

Англійською школою «міської морфології» для виявлення матеріальної спадщини та подальшої її інвентаризації було запропоновано проектно-аналітичний метод – Urban Morphology [9].

За допомогою морфологічного підходу розширюється фокус уваги на тому, що будівля займає лише один із п'яти важливих шарів, а на основі окремих об'єктів культурної спадщини та регулярної забудови намагаємося змінити сприйняття цінності історичної спадщини.

За допомогою цього методу можна вловити важливі аспекти території, зрозуміти, чого вони варті і як надати відповідний вектор розвитку. Суть цього методу полягає в тому, що міста сприймаються як уявні розшарування основних містоутворюючих форм на шари, які у містобудівній теорії називаються морфологічними шарами міста [9].

Кожен шар містить певну форму. Наприклад, форми природні – мережа водойм, пагорбів; форми антропогенні – вулична мережа, форма будівель. Проте вони нерозривно пов'язані між собою, утворюючи єдиний міський простір. Така гіпотетична стратифікація аналізує цілісні міські форми та допомагає перевірити, як минулі чи гіпотетично майбутні зміни в одному шарі призводять до змін у всіх нижніх чи верхніх шарах [9].

В рамках проведених досліджень нами розроблено схему морфологічних шарів історичної частини м. Луцька на основі проектно-дослідницького методу англійської школи «міської морфології» - Urban Morphology (рис.1). Такими морфологічними шарами є: будівлі, вулиці, зелені насадження, рельєф та акваторії.



Рис. 1. Проектно-дослідницький метод англійської школи «міської морфології» - Urban Morphology

Таким чином, цей морфологічний підхід дозволяє уникнути фрагментарних міських змін, хаотичної забудови, які можуть негативно вплинути на розвиток міста або його окремих частин. Цей підхід є гарним інструментом для проектування цілісного перспективного розвитку міської території.

Висновки. При розробці концепції розвитку міста або його частини постає завдання – виявити основні аспекти ідентичності міста та запропонувати інструменти для їх розкриття у нових проєктах. Побудова доведеного взаємозв'язку між духом міста та його містобудівною матерією повинна стати принциповою новизною концепції, а це і є одночасно і наукова, і прикладна цінність.

Тому використання різних підходів, в тому числі і морфологічного, дасть змогу розробити концепцію розвитку міста або його частини, яка задовільнила б усіх мешканців міста та зацікавлених сторін.

References

1. Leyptsyz'ka Khartiya «Mista Yevropy na shlyakhu staloho rozvytku» : pryunyata z nahody neformal'noyi zustrichi ministriv z pytan' mis'koho rozvytku i terytorial'noyi yednosti, provedenoyi v m. Leyptsyzi 24–25 travnya 2007 roku. URL: http://2.auc.org.ua/sites/default/files/leypczka_hartiya.pdf

2. Halushka Z.I., Sobolyev V.O. Kontseptsiya intehrovanoho rozvytku mist: neobkhidnist' ta mozhyvosti zastosuvannya v Ukraini / Z.I. Halushka, V.O. Sobolyev // Problemy systemnoho pidkhodu v ekonomitsi: zbirnyk naukovykh prats'. – K.: NAU, 2019. – Vypusk 1(69). CH.1. – S. 80 – 85.

3. Intehrovana kontseptsiya rozvytku seredmistya Chernivtsiv. – Chernivtsi. 2015.- 54 s.

4. Intehrovana kontseptsiya rozvytku tsentral'noyi chastyny L'vova. – L'viv. 2011.- 46 s.

5. Kontseptsiya intehrovanoho rozvytku m. Vinnytsi 2030 – Vinnytsya. 2018. – 153 s. [Elektronnyy resurs] – Rezhym dostupu: <https://city2030.org.ua/ua/document/proekt-koncepcii-integrovanogo-rozvitkumista-vinnicya-2030-kirm-vinnicya-2030>

6. Vereshko O.V., Lyashuk S.V., Voytyuk A.I., Homon S.S. Rozrobka propozytsiyi pereplanuvannya prostoru na osnovi analizu terytoriyi istorychnoyi chastyny m. Luts'ka // Suchasni problemy mistobuduvannya. Perspektyvy ta priorityety rozvytku: zbirnyk tez dopovidey mizhnarodnoyi nauково-praktychnoyi konferentsiyi uchenykh ta studentiv, 19 lystopada 2021 r., m. Luts'k [Elektronnyy resurs] – Luts'k: Luts'kyi NTU, 2021. – S. 14-15. Rezhym dostupu: <https://konf-mbg.wixsite.com/Intu-bci-mbg-2021>

7. Vereshko O.V., Lyashuk S.V., Sokur T. D., Kuz'mych V.V., Vereshko A.O. Rekonstruktsiya istorychnoyi zabudovy yak zaporuka pryvablyvosti mista // Suchasni tekhnolohiyi ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi: zb. nauk. prats' – Luts'k: Luts'kyi NTU, 2019. – Vyp. 12. - S. 37-43. doi:10.36910/6775-2410-6208-2019-2(12)-05

8. Vereshko O.V., Lyashuk S.V., Ivasenko V.V. Pryntsypy blahoustroyu istorychnoyi chastyny mista Luts'ka // Problemy intehrovanoho rozvytku mist: zbirnyk tez dopovidey mizhnarodnoyi nauково-praktychnoyi konferentsiyi uchenykh ta

studentiv, 29-31 sichnya 2020 r., m. Luts'k [Elektronnyy resurs] – Luts'k: Luts'kyy NTU, 2020. – S. 15-17. 0,13 druk. ark. Rezhym dostupu: <https://konf-mbg.wixsite.com/Intu-bci-mbg-2020>

9. Urban Morphology: Comparative Study of Different Schools of Thought / G. Sadeghi, Baofeng Li // Current Urban Studies. - 2019, 7, 562-572. DOI: 10.4236/cus.2019.74029. Rezhym dostupu: https://www.scirp.org/pdf/cus_2019120414130218.pdf

Список використаної літератури

1. Лейпцизька Хартія «Міста Європи на шляху сталого розвитку»: прийнята з нагоди неформальної зустрічі міністрів з питань міського розвитку і територіальної єдності, проведеної в м. Лейпцизі 24–25 травня 2007 року. URL: http://2.auc.org.ua/sites/default/files/leypczizka_hartiya.pdf

2. Галушка З.І., Соболев В.О. Концепція інтегрованого розвитку міст: необхідність та можливості застосування в Україні / З.І. Галушка, В.О. Соболев // Проблеми системного підходу в економіці: збірник наукових праць. – К.: НАУ, 2019. – Випуск 1(69). Ч.1. – С. 80 – 85.

3. Інтегрована концепція розвитку середмістя Чернівців. – Чернівці. 2015.- 54 с.

4. Інтегрована концепція розвитку центральної частини Львова. – Львів. 2011.- 46 с.

5. Концепція інтегрованого розвитку м. Вінниці 2030 – Вінниця. 2018. – 153 с. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://city2030.org.ua/ua/document/proekt-koncepcii-integrovanogo-rozvitkumista-vinnicya-2030-kirm-vinnicya-2030>

6. Верешко О.В., Ляшук С.В., Войтюк А.І., Гомон С.С. Розробка пропозиції перепланування простору на основі аналізу території історичної частини м. Луцька // Сучасні проблеми містобудування. Перспективи та пріоритети розвитку: збірник тез доповідей міжнародної науково-практичної конференції учених та студентів, 19 листопада 2021 р., м. Луцьк [Електронний ресурс] – Луцьк: Луцький НТУ, 2021. – С. 14-15. Режим доступу: <https://konf-mbg.wixsite.com/Intu-bci-mbg-2021>

7. Верешко О.В., Ляшук С.В., Сокур Т. Д., Кузьмич В.В., Верешко А.О. Реконструкція історичної забудови як запорука привабливості міста // Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві: зб. наук. праць – Луцьк: Луцький НТУ, 2019. – Вип. 12. - С. 37-43. doi:10.36910/6775-2410-6208-2019-2(12)-05

8. Верешко О.В., Ляшук С.В., Івасенко В.В. Принципи благоустрою історичної частини міста Луцька // Проблеми інтегрованого розвитку міст: збірник тез доповідей міжнародної науково-практичної конференції учених та студентів, 29-31 січня 2020 р., м. Луцьк [Електронний ресурс] – Луцьк: Луцький НТУ, 2020. – С. 15-17. 0,13 druk. ark. Rezhym dostupu: <https://konf-mbg.wixsite.com/Intu-bci-mbg-2020>

9. Urban Morphology: Comparative Study of Different Schools of Thought / G. Sadeghi, Baofeng Li // Current Urban Studies. - 2019, 7, 562-572. DOI: 10.4236/cus.2019.74029. Rezhym dostupu: https://www.scirp.org/pdf/cus_2019120414130218.pdf

**АНАЛІЗ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА
ОСОБЛИВОСТЕЙ ЗАСТОСУВАННЯ ГЕОПІНИ**

**ANALYSIS OF THE OPERATIONAL PROPERTIES AND
APPLICATION FEATURES OF GEOFOAM**

**Заякін Д.К., аспірант, Делявський М.В., д.т.н., проф.,
Мікулич О.А., д.т.н., проф. (Луцький національний технічний
університет)**

**Zaiakin D.K., PhD student, Delyavsky M.V., Doctor of Science,
Professor, Mikulich O.A., Doctor of Science, Professor (Lutsk National
Technical University)**

У роботі проведено аналіз експлуатаційних властивостей та особливостей застосування геопіни у провідних країнах світу. На основі аналізу експериментальних досліджень на стиск зразків геопіни різної густини встановлено, що при зростанні густини матеріалу спостерігається практично лінійна зміна межі текучості та модулю Юнга матеріалу. Описано також основні особливості використання геопінополістиролу. Проведений аналіз може бути корисним в Україні для швидкого відновлення автомобільних доріг та магістралей, що пошкоджені внаслідок військових дій.

Structural elements made of expanded polystyrene have been used for various engineering solutions since the middle of the last century. This material is light, so its use in aspects of road structures requires the use of particular engineering approaches accounting for the characteristics of the material. However, this approach allows to solve many engineering problems in a short period.

In addition, geofoam has good thermal insulation properties, stiffness and compressive strength compared to clay and some soil types. Therefore, this material is used in different countries for some types of soil to reduce subsidence under embankments.

Also, the use of geofoam in road construction elements reduces noise and vibration. This material is also used to solve engineering problems related to the reduction of lateral pressure on structural elements, the reduction of stresses in rigid buried pipelines and other related applications.

The work is devoted to the review and analysis of the operational properties and features of the use of geofoam to solve engineering problems in the design of road construction elements.

The analysis of changes in the mechanical characteristics of geofoam and the review of studies known in the literature showed that the use of such materials has many features. When using polystyrene, it should be taken into account that this material is much lighter than water, so certain specific engineering solutions should be used to overcome the lifting force.

Despite the peculiarities of the use of such materials, geofam is successfully used all over the world: Norway, the Netherlands, the United States, Japan, Germany and Malaysia. Therefore, such experience can also be useful for Ukraine, taking into account the military situation and the need for rapid construction and reconstruction of destroyed and damaged road surfaces.

Ключові слова: геопіна, геопінополістирол, механічні характеристики.

Keywords: geofam, geopinopolystyrene, elastic properties.

Вступ. Елементи конструкцій, що виготовлені з пінополістиролу, почали використовуватися для різних інженерних рішень із середини минулого століття. Цей матеріал є легким, тому його використання у елементах дорожніх конструкцій вимагає застосування спеціальних інженерних підходів з урахуванням особливостей матеріалу. Проте, такий підхід дозволяє вирішити багато задач за короткі часові терміни. Крім того, геопіна має хороші теплоізоляційні властивості, жорсткість і міцність на стиск у порівнянні з глиною та деякими видами ґрунтів. Тому цей матеріал у різних країнах для деяких типів ґрунтів використовується для зменшення осідання під насипами.

Також використання геопіни в елементах дорожніх конструкцій забезпечує зменшення шуму та вібрації. Цей матеріал також використовується для вирішення інженерних задач, пов'язаних зі зменшенням бічного тиску на елементи конструкції, зменшення напружень на жорстких заглиблених трубопроводах та інших, пов'язаних з цим, застосувань.

Постановка мети та задач досліджень. Робота присвячена огляду та аналізу експлуатаційних властивостей та особливостей застосування геопіни для вирішення інженерних задач при проектуванні елементів дорожніх конструкцій.

Основна частина. Проблема збільшення автострад та кількості доріг, а також їх завантаженості у регіонах з м'якими ґрунтами, для яких важко забезпечити здатність витримувати значні інтенсивні вагові та часові навантаження, може бути вирішена при використанні елементів, що виготовлені з геопіни [1]. Для вирішення цієї задачі необхідно здійснювати розробку методів збільшення вантажотримкості дорожніх покриттів при збільшенні інтенсивності руху по них, що пов'язано зі зменшенням вертикального навантаження на ґрунт.

Геопіна – це будівельний матеріал, який почав використовуватися в геотехнічній інженерії для вирішення вище згаданих задач у країнах з м'яким ґрунтом з 60-х років минулого століття [2]. Використання піноблоків із пінополістиролу (геопіни) або конструкційних піноблоків, що є легкою альтернативою ґрунту, має низку переваг (рис. 1, а-е) [3]:

- забезпечує істотне прискорення будівництва;

- надає можливість проводити будівництво при несприятливих погодних умовах;
- запобігає руйнуванню схилів та ін.



Рис. 1. Застосування блоків з геопіни для різних інженерних рішень [1]

Пінополістирол (EPS або геопіна), що є надлегкою твердою поліетиленовою піною із закритими порами, був винайдений у 1950 році

[4]. Відтоді відбулося інтенсивне зростання використання цього матеріалу у різних країнах, що мають м'які ґрунти: в Норвегії, Нідерландах, Сполучених Штатах, Японії, Німеччині та Малайзії.

У [5] описано застосування геопіни для ізоляції доріг у Норвегії, що було виконано у 1965 році. У 1972 році було завершено перший проект насипу дороги з використанням геопіни EPS [6]. Проект Національної дороги 159 Flom Bridges передбачав заміну одного метра звичайного насипного матеріалу блоками EPS в насипах, що примикають до мосту, закладеного на палях, до твердого ґрунту. Насипи спиралися на шар торфу товщиною 3 метри, вище 10 метрів знаходилася м'яка, чутлива глина [7] (рис. 2).

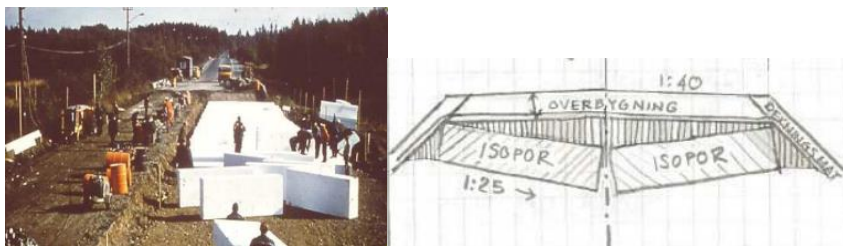


Рис. 2. Використання геопіни при будівництві дороги 159 Flom Bridges [7]

До використання геопіни EPS темпи осідання становили близько 20-30 см на рік і прискорювалися через часте коригування рівня дороги. Використання геопіни дозволило успішно зупинити осадку.

У [8] описано перше застосування EPS геопіни в Японії, де була використана для заповнення набережної у 1985 році. При виконанні проекту було задіяно 470 куб. геопінопласту EPS, що заповнював висоту 15 м. Конструкції геопінополістиролу показали хороші експлуатаційні характеристики за дії як статичного навантаження, так і динамічного. Досвід Японії із застосування EPS geofoam показав, що конструкції, виготовлені з EPS geofoam, добре витримують і сейсмічні навантаження. Протягом 1993-1995 рр. сильні землетруси, що сталися в різних частинах Японії (діапазон магнітуд від 6,6 до 8,1), не завдали істотної шкоди конструкціям, виготовленим з геопіни.

Геопіна деформується як пружно-пластичний матеріал. Для оцінки зміни механічних характеристик геопіни зі зміною її густини актуальним завданням є врахування залежності зміни цих характеристик: межі текучості та модуля Юнга при зміні щільності матеріалу. Це дозволить не тільки спрогнозувати зміну межі появи пластичних деформацій у

матеріали, а й оптимально підібрати його експлуатаційні характеристики. Крім того, такий підхід дозволяє здійснювати оцінку механічних характеристик геопіни у випадку, коли густина отриманого піноматеріалу відрізняється від відомих у літературі значень, для яких проведено експериментальні дослідження та наявні експериментальні дані.

Проводячи аналіз результатів експериментальних досліджень на стиск зразків з геопіни [9, 10], зміна величин межі текучості та модуля Юнга при зміні густини матеріалу представлена на рис. 3, а та 3, б відповідно.

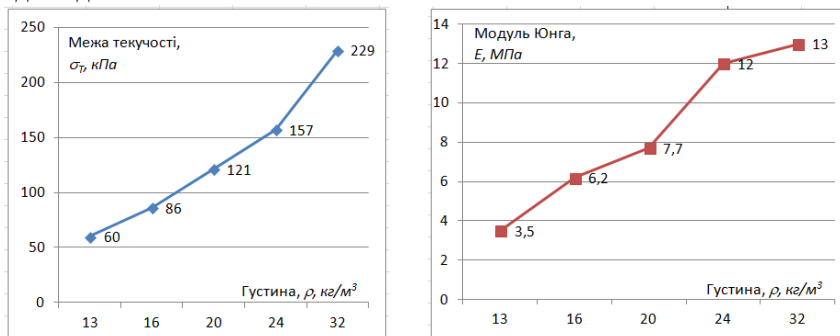


Рис. 3 Залежність межі текучості та модуля Юнга від густини геопінополістиролу при стиску

Аналіз кривих на рис. 3 показує, що для геопінополістиролу характерна практично лінійна залежність зміни механічних характеристик при зростанні густини матеріалу. Також особливістю використання таких матеріалів для вирішення різних інженерних задач є і той факт, що при зростанні густини відбувається зростання величини модулю Юнга. Тому розрахунок елементів конструкцій, виготовлених з таких матеріалів, має проводитися за використання уточнених підходів механіки суцільного середовища

Висновки. Аналіз зміни механічних характеристик геопіни та розгляд відомих у літературі досліджень показав, що використання таких матеріалів має багато особливостей. При застосуванні геопінополістиролу слід враховувати, що цей матеріал набагато легший за воду, тому для подолання підйомної сили слід використовувати певні специфічні інженерні рішення.

Незважаючи на особливості застосування таких матеріалів, геопіна успішно використовується в усьому світі: це Норвегія, Нідерланди, Сполучені Штати, Японія, Німеччина та Малайзія. Тому такий досвід також може бути корисним і для України, зважаючи на військову ситуацію

та потребу у швидкому будівництві та реконструкції знищених і пошкоджених дорожніх покриттів.

References

1. <https://www.geof foam.com>
2. Alfheim, S.L. Plastic Foam in Road Construction – not only for Frost Protection (in Norwegian). *Frost i Jord*, No. 15., 1975
3. <https://www.panelsan.com/en/product/40/geof foam-new>
4. BASF Corp., Styropor Technical Information. *Technical Information*, BASF Corp., Germanv, 1997.
5. Aabe, R. Evidence of EPS Long Term Performance and Durability as a Light Weight Fill. *Transportation Research Board 79th Annual Meeting, Washington, D.C., USA*, 2000.
6. Frydenlund T.E. and Aabøe R. Long term performance and durability of EPS as a lightweight filling material, *Proc. 3rd Int. Conf. on EPS Geof foam*, Salt Lake City, 2001, P. 1-14.
7. Flaate, K. The (Geo)Technique of Superlight Materials. *The Art and Science of Geotechnical Engineering*, Prentice Hall Inc., 10, 1989, pp. 193-205.
8. Miki, H. An Overview of Lightweight Banking Technology in Japan. *Proceedings of the International Symposium on EPS Construction Method*, Tokyo, Japan, 1996, pp. 9-30.
9. Bejua Y. Z., Mandalb J. N. Expanded polystyrene (EPS) geof foam: preliminary characteristic evaluation. *Procedia Engineering*, 189, 2017, pp. 239 – 246.
10. Malai A., Youwai S. Stiffness of Expanded Polystyrene Foam for Different Stress States. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 2021, 7:80.

Список використаної літератури

1. <https://www.geof foam.com>
2. Alfheim, S.L. Plastic Foam in Road Construction – not only for Frost Protection (in Norwegian). *Frost i Jord*, No. 15., 1975
3. <https://www.panelsan.com/en/product/40/geof foam-new>
4. BASF Corp., Styropor Technical Information. *Technical Information*, BASF Corp., Germanv, 1997.
5. Aabe, R. Evidence of EPS Long Term Performance and Durability as a Light Weight Fill. *Transportation Research Board 79th Annual Meeting, Washington, D.C., USA*, 2000.
6. Frydenlund T.E. and Aabøe R. Long term performance and durability of EPS as a lightweight filling material, *Proc. 3rd Int. Conf. on EPS Geof foam*, Salt Lake City, 2001, P. 1-14.
7. Flaate, K. The (Geo)Technique of Superlight Materials. *The Art and Science of Geotechnical Engineering*, Prentice Hall Inc., 10, 1989, pp. 193-205.
8. Miki, H. An Overview of Lightweight Banking Technology in Japan. *Proceedings of the International Symposium on EPS Construction Method*, Tokyo, Japan, 1996, pp. 9-30.
9. Bejua Y. Z., Mandalb J. N. Expanded polystyrene (EPS) geof foam: preliminary characteristic evaluation. *Procedia Engineering*, 189, 2017, pp. 239 – 246.
10. Malai A., Youwai S. Stiffness of Expanded Polystyrene Foam for Different Stress States. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 2021, 7:80.

**МОДИФІКОВАНІ ВИСОКОМІЦНІ БЕТОНИ ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦІЇ
ІНЖЕНЕРНИХ СПОРУД ТА МЕРЕЖ, ДОРІГ**

**HIGH STRENGTH MODIFIED CONCRETE FOR RECONSTRUCTION
OF ENGINEERING STRUCTURES AND NETWORKS, ROADS**

Ксьоншкевич Л. М., к.т.н., доц., Крантовська О. М., к.т.н., доц. (Одеська державна академія будівництва та архітектури, Одеса), Синій С. В., к.т.н., доц., Сунак П. О., к.т.н., доц. (Луцький національний технічний університет, Луцьк), Орешкович Матія, к.т.н., доц. (Північний університет, Вараздін, Хорватія), Ксьоншкевич А. С., студентка (Одеська державна академія будівництва та архітектури, Одеса)

Ksonshkevych L. M., Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Krantovska O. M., Ph.D. in Engineering, Associate Professor (Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa), Synii S. V., Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Sunak P. O., Ph.D. in Engineering, Associate Professor (Lutsk National Technical University, Lutsk), Orešković Matija, Ph.D. in Engineering, Associate Professor (University North, Varazdin, Croatia), Ksonshkevych A. S., student (Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa)

Розглянуто вплив рецептурно-технологічних факторів на фізико-механічні властивості цементного в'язучого. Виявлено, що сумісне дослідження факторів впливу – механоактивації та мікрокремнезему, при визначеній концентрації Супер ПК і поліпропіленової фібри, дозволяє збільшити міцність цементного каменю в 28-ми добовому віці з 62,41 до 113,4 МПа, тобто більше, ніж у 1,8 раза в порівнянні з контролем. Це дозволить в подальшому застосовувати зазначений склад цементного в'язучого для приготування високоміцних бетонів в дорожньому будівництві, зокрема при обґрунтованих інженерними розрахунками реконструкції, відновленні вулиць та доріг, враховуючи елементи конструкцій та конструктивні елементи інженерних споруд та мереж.

The use of such a material as concrete as part of various structural elements of road construction facilities is quite widespread, promising and is constantly being improved. The important properties of concrete used in the construction and reconstruction of engineering structures and networks, streets and roads of road management is its ability to withstand long-term effects of dynamic loads in combination with various atmospheric factors. The purpose of the article was to study the possibility of using ordinary Portland cement in concrete used for reconstruction and rehabilitation of engineering structures and networks, roads. For this, it is necessary to reveal the effect of mechanical activation of the binder (portland cement + microsilica + plasticizer

Super PC + polypropylene fiber) on the mechanical characteristics of cement stone (the first series of experimental studies).

In the experiment, ordinary Portland cement PCII/A-III was used, the consumption of microsilica varied in the range of 0...10% of the cement mass. The concentration of Super PC superplasticizer was assumed to be equal to 0 ... 1% of the mass of the binder. Polypropylene fiber with fiber sizes from 6 mm to 12 mm and in the amount from 0 to 1% was used as an additive. The suspension activation time was 120 seconds. Compression tests of samples were carried out after 3, 7 and 28 days. For control, samples of similar compositions were prepared, the binder of which did not undergo activation.

It was found that the combined study of the influencing factors – mechanoactivation and microsilica, with a certain concentration of Super PC and polypropylene fiber, allows to increase the strength of cement stone at the age of 28 days from 62.41 to 113.4 MPa, i.e. more than 1.8 times compared to the control. This will make it possible to use the specified composition of cement binder in the future for the preparation of high-strength concrete in reconstruction and rehabilitation of engineering structures and networks, roads.

Ключові слова: механоактивація, фібра, суперпластифікатор, модифіковані високоміцні бетони, реконструкція, інженерні споруди, інженерні мережі, дороги, утримання міської забудови.

Keywords: mechanical activation, fiber, superplasticizer, high strength modified concrete, reconstruction, engineering structures, engineering networks, roads, maintenance of urban buildings.

Постановка проблеми. В умовах сучасності, коли велика кількість об'єктів дорожнього господарства знаходяться в незадовільному стані або взагалі зруйновані, стає актуальним питання їх швидкого відновлення чи реконструкції із введенням в експлуатацію. Багато елементів конструкцій та конструктивних елементів таких об'єктів виготовлені з використанням бетону. Важливими властивостями бетону, що використовується при будівництві та реконструкції інженерних споруд та мереж, вулиць та доріг дорожнього господарства, є його здатність витримувати довготривалу дію динамічних навантажень у поєднанні з різноманітними атмосферними факторами. Для будівництва та реконструкції вулиць та доріг в основному застосовуються спеціальні види цементу. Щоб використовувати рядовий портландцемент в даній сфері потрібно модифікувати склад в'язучого, а також застосовувати технології приготування, які інтенсифікують процеси структуроутворення. Аналогічні завдання, в більшій чи меншій мірі, стосуються й елементів конструкцій інженерних споруд та мереж, які використовуються у дорожньому будівництві. Тому, одним з актуальних питань реконструкції та відновлення інженерних споруд та мереж, вулиць та доріг дорожнього господарства є впровадження технологій приготування бетонів швидкого твердіння та високої міцності.

Аналіз відомих досліджень і публікацій. Застосування такого матеріалу як бетон у складі різноманітних конструктивних елементів

об'єктів міської інфраструктури, враховуючи дорожнього господарства, є досить розповсюдженим, перспективним та постійно удосконалюється з метою покращення експлуатаційних характеристик таких об'єктів [1-8]. Також, доцільне застосування бетону як матеріалу у складі елементів конструкцій доріг, елементів конструкцій та конструктивних елементів споруд транспортно-пішохідних та інженерних мереж, що будуються чи реконструюються на землях рекреаційного призначення [8-10 та ін.].

Основною складовою бетонів на мінеральному в'язучому є портландцемент. Оскільки виробництво цементу спричиняє негативні глобальні зміни клімату через великі викиди парникових газів, то використання у цементі відходів виробництва частково зменшує цю проблему [11 та ін.]. Серед активних мінеральних добавок важлива роль у формуванні структури цементного каменю відводиться мікрокремнезему [12-14 та ін.]. Підвищує роль мікрокремнезему в в'язучому також і наявність суперпластифікаторів. Завдяки синергетичному ефекту вказані інгредієнти підсилюють один одного, що забезпечує разом з високою рухливістю також і високі механічні характеристики цементного каменю та бетону на його основі [13, 14].

Можливість більш інтенсивного набору міцності бетону, особливо в ранні терміни твердіння, може бути здійснена цілеспрямовано зміненою структурою цементного каменю як за рахунок механоактивації зерна цементу і мікрокремнезему, так і за рахунок модифікації їх поверхні поверхнево-активними речовинами та введенням добавок таких як поліпропіленова фібра [15 та ін.]. Загалом, фібра – універсальна армована добавка, що поліпшує відразу кілька характеристик бетонної суміші та активно використовується як у промисловому (промислові стяжки і підлоги, дорожні та аеродромні покриття, гідротехнічні та інші споруди, конструкції перетину вулиць та доріг з інженерними мережами і елементи конструкцій інженерних мереж тощо), так і в приватному секторі [4-8]. Переваги використання поліпропіленових мікрОВОЛОКОН очевидні – це зниження ймовірності утворення тріщин при усадці і висиханні бетону, підвищення міцнісних характеристик (на стиск і розтяг при згині), підвищення ударної в'язкості і т.п. [12-17 та ін.].

Таким чином, багатокомпонентність комплексних добавок поряд з механоактивацією в'язучого дозволяє різко покращити характеристики твердіючого цементного каменю, що в результаті вплине як на швидкість твердіння, так і на значення міцності цементного каменю та бетону. Пропонована технологія – механоактивація [12] разом з модифікацією, дозволяє підняти потенційні можливості в'язучого, переводячи рядовий портландцемент в розряд швидкотвердіючого і високоміцного.

Мета статті – застосування рядового портландцементу в бетонах, що використовуються для реконструкції та відновлення інженерних споруд та мереж, вулиць та доріг дорожнього господарства.

Основні завдання: Дослідити вплив механоактивації в'язучого (портландцемент + мікрокремнезем + пластифікатор Супер ПК + поліпропіленова фібра) на механічні характеристики цементного каменю.

Виклад основного матеріалу. Перша серія експериментальних досліджень передбачала визначення сумісного впливу мікрокремнезему, розріджувача Супер ПК та органічних волокон на міцність цементного каменю. В експерименті в якості в'язучого використовувався портландцемент ПЦІ/А-Ш. Витрата мікрокремнезему Нікопольського феросплавного заводу варіювалася в діапазоні 0...10 % від маси цементу. Концентрація суперпластифікатора Супер ПК приймалася рівною 0...1 % від маси в'язучого. Як добавка використовувалась поліпропіленова фібра з розмірами волокон від 6 мм до 12 мм і в кількості 0...1 %. Час активації суспензії становив 120 сек. Швидкість обертання ротора активатора приймалася рівною 2800 об/хв. Після активації суспензії витримувалися у формах протягом однієї доби при $t = +20^{\circ}\text{C}$, після чого зразки поміщалися в камеру нормального твердіння. Випробування зразків на стиск здійснювалися через 3, 7 і 28 діб. Для контролю готувалися зразки аналогічних складів, в'язуче яких не зазнавало активації.

Встановлено, що за інших рівних умов механоактивація цементовмісних суспензій призводить до підвищення характеристик міцності цементного каменю у всьому дослідженому часовому інтервалі (рис. 1).

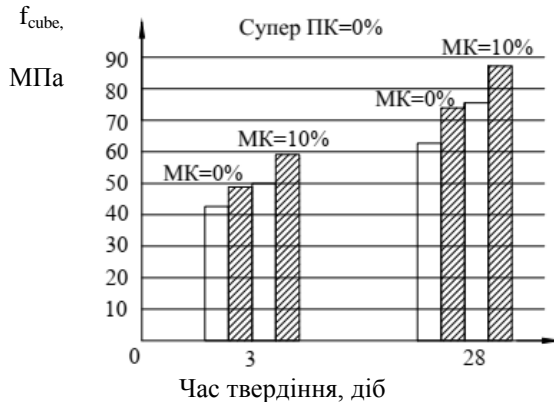


Рис. 1. Кінетика зміни міцності цементного каменю в часі при Супер ПК = 0 %

□ - контроль; ▨ - механоактивація

Встановлено, що збільшення вмісту мікрокремнезему у в'язучому призводить до зростання міцності цементного каменю на механоактивованому в'язучому. Більшою мірою вплив мікрокремнезему на міцність цементного каменю позначається у віддалені терміни твердіння – 28 діб. Так, якщо в 3-и добовому віці міцність цементного каменю (вміст Супер ПК = 0 %) при збільшенні мікрокремнезему до 10 % підвищується на 17 %, то в 28-добовому віці приріст міцності становить практично 44 %.

При введенні Супер ПК (1 %) у воду замішування та збільшенні вмісту мікрокремнезему з 0 до 10 %, міцність цементного каменю на механоактивованому в'язучому у віці 3-х діб зростає з 60,1 до 68,3 МПа, а у віці 28-и діб – із 93,1 до 109,4 МПа (рис. 2).

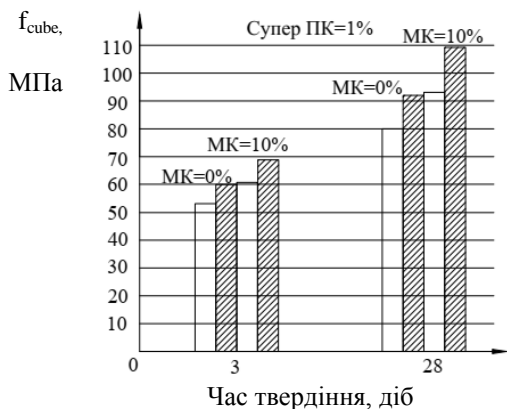


Рис. 2. Кінетика зміни міцності цементного каменю в часі при Супер ПК = 1 %

- контроль;
 - механоактивація

Наведені на рис. 3 криві наростання міцності цементного каменю в часі свідчать про певний вклад поліпропіленової фібри в кінетику набору міцності, але він незначний. Це характерно як у ранні терміни (3 добу), так і в більш віддалені терміни твердіння (28 добу). Проведені досліді підтвердили участь мікрокремнезему, пластифікатора Супер ПК та поліпропіленової фібри у фізико-механічних процесах організації структури твердіючого цементного в'язучого.

Механоактивація зерен цементу та мікрокремнезему в присутності пластифікатора Супер ПК та поліпропіленової фібри (до 1 %) забезпечує як прискорення процесів структуроутворення, так і підвищення механічних характеристик цементного каменю, а надалі і бетонів на їх основі.

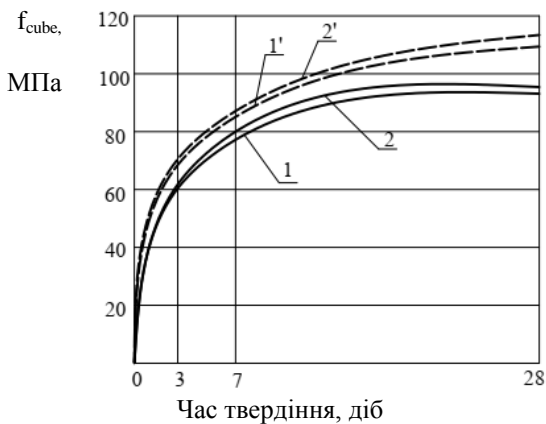


Рис. 3. Кінетика наростання міцності цементного каменю в часі:

МК = 10 %, Супер ПК = 1 %;

1, 1' – вміст поліпропіленової фібри $\Phi = 0$ %;

2, 2' – вміст поліпропіленової фібри $\Phi = 10$ %;

— - - - - контроль;

- - - - - механоактивоване в'язуче

Висновки. Сумісне дослідження факторів впливу – механоактивації та мікрокремнезему, при визначеній концентрації Супер ПК та поліпропіленової фібри, дозволяє збільшити міцність цементного каменю в 28-ми добовому віці з 62,41 до 113,4 МПа, тобто більше, ніж у 1,8 раза в порівнянні з контролем. Це дозволить в подальшому застосовувати зазначений склад цементного в'язучого для приготування високоміцних бетонів для об'єктів дорожнього будівництва, зокрема для реконструкції та

відновлення елементів конструкцій інженерних споруд та мереж, вулиць та доріг дорожнього господарства.

References

1. Runova R. F., Rudenko I. Y., Troyan V. V. etc. Formation of the structure of high-strength concrete. *Building materials, products and sanitary equipment*. 2008. No.29. pp. 91-97.
2. Troian V. V. Tekhnolohichni osnovy pidvyshchennia ta prohnozuvannia dovhovichnosti betoniv dlia masyvnykh sporud. Kyiv, Interservis. 2017. 238 c.
3. Borziak O. S. Regulation of contact interactions to increase the resistance under operating conditions of materials based on mineral binders. Thesis doctor of techn. sc., spec. 05.23.05 – Building materials and products. UkrSURT, Kharkiv, 2021.
4. Dvorkin L. Y., Babych Ye. M., Zhytkovskiy V. V., Bordiuzhenko O. M., Kochkarov D. V., Filipchuk S. V., Kovalyk I. V., Kovalchuk T. V., Skrypyuk M. M. High-strength rapid hardening concretes and fiber reinforced concretes. Rivne, NUVGP. 2017. 331 p.
5. Andriichuk O. V. Stalefibrobetonni lotky vodovidvedennia. Lutsk, RVV Lutskoho NTU. 2018. 150 s.
6. Marushchak U. D., Sydor N. I., Braichenko S. P., Margal I. V., Soltysik R. A. Modified fiber reinforced concrete for industrial floors. *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 708. N 1. 012094.
7. Sunak P. O., Synii S. V., Melnyk J. A., Parasyk B. O. Effective application areas of fibre reinforced concrete. *Modern technologies and methods of calculations in construction*. 2018. Vol. 9. pp. 136-142.
8. Andriichuk O. V., Uzhegov S. O. Steel fiber concrete – effective material in road building. *Modern technologies and methods of calculations in construction*. 2017. Vol. 6. pp. 3-8.
9. Synii S. V., Melnyk Yu. A., Sunak P. O., Ksonshkevych L. M., Krantovska O. M. Design of sewerage networks using the principles of SWOT analysis. *Modern technologies and methods of calculations in construction*. 2021. Vol. 16. pp. 171-179. URL: [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2021-6\(16\)-22](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2021-6(16)-22)
10. Synii S. V., Krantovska O. M., Ksonshkevych L. M., Orešković M., Sunak P. O. Rationale of structures of fencing of the territory of the Lutsk Zoo, taking into account the analysis of the history of urbanization of landscape. *Modern technologies and methods of calculations in construction*. 2022. Vol. 17. pp. 138-145. URL: [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-7\(17\)-18](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-7(17)-18)
11. Blikharskyi Z., Sobol K., Markiv T., Selejdak J. Properties of Concretes Incorporating Recycling Waste and Corrosion Susceptibility of Reinforcing Steel Bars. *Materials*. 2021. N 14(10). 2638. URL: <https://doi.org/10.3390/ma14102638>

12. Barabash I., Harashenko D. Mechanoactivation of Portland cement in the technology of manufacturing the self-compacting concrete. *Eastern-european journal of enterprise technologies*. 2018. N 3/6 (93). pp. 12-17.
13. Ksonshkevych L., Krantovska O., Petrov M., Synii S., Uhl A. Investigation of the structure of cement stone, obtaining and optimization of high-strength concrete on mechanically activated binder. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 230. 03010. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823003010>
14. Ksonshkevych L. M., Barabash I. V., Krantovska O. M., Synii S. V., Sunak P. O. Disperse reinforced concrete with polycarboxylate addition on a mechanically activated binder. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 708. N 1. 012092. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012092>
15. TM Fiber. URL: <https://fiber.ua/uk/fibra-polipropilenova-tm-fiber>
16. Sanytsky M., Marushchak U., Olevych Y., Novytskyi Y. Nano-modified ultra-rapid hardening Portland Cement compositions for high strength concretes. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020. Vol. 47. pp. 392-399.
17. Marushchak U., Sanytsky M., Korolko S. Nanomodified rapid hardening fiber-reinforced concretes. *Visnyk NU "Lvivska politehnika". Seriia: Teoriia i praktyka budivnytstva*. 2017. N 877. pp. 137-143.

Список використаної літератури

1. Рунова Р. Ф., Руденко И. И., Троян В. В. та ін. Формирование структуры высокопрочных бетонов. *Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка*. 2008. №29. С. 91-97.
2. Троян В. В. Технологічні основи підвищення та прогнозування довговічності бетонів для масивних споруд. Київ, Інтерсервіс. 2017. 238 с.
3. Борзяк О. С. Регулювання контактних взаємодій для підвищення стійкості в умовах експлуатації матеріалів на основі мінеральних в'язучих. Дис. докт. техн. наук, спец. 05.23.05 – Будівельні матеріали та виробы. УкрДУЗТ, Харків, 2021.
4. Дворкін Л. Й., Бабич Є. М., Житковський В. В., Бордюженко О. М., Кочкар'ов Д. В., Філіпчук С. В., Ковалик І. В., Ковальчук Т. В., Скрипник М. М. Високоміцні швидкотверднучі бетони та фібробетони. Рівне, НУВГП. 2017. 331 с.
5. Андрійчук О. В. Сталефібробетонні лотки водовідведення. Луцьк, РВВ Луцького НТУ. 2018. 150 с.
6. Marushchak U. D., Sydor N. I., Braichenko S. P., Margal I. V., Soltysik R. A. Modified fiber reinforced concrete for industrial floors. *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 708. N 1. 012094.
7. Сунак П. О., Синій С. В., Мельник Ю. А., Парасюк Б. О. Ефективні галузі застосування сталефібробетону. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2018. Вип. 9. С. 136-142.
8. Andriichuk O. V., Uzhegov S. O. Steel fiber concrete – effective material in road building. *Modern technologies and methods of calculations in construction*. 2017. Vol. 6. pp. 3-8.

9. Синій С. В., Мельник Ю. А., Сунак П. О., Ксьоншкевич Л. М., Крантовська О. М. Проектування каналізаційних мереж з використанням принципів SWOT-аналізу. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2021. Вип. 16. С. 171-179. URL: [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2021-6\(16\)-22](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2021-6(16)-22)
10. Синій С. В., Крантовська О. М., Ксьоншкевич Л. М., Орешкович М., Сунак П. О. Обґрунтування споруд огороження території Луцького зоопарку з урахуванням аналізу історії урбанізації ландшафту. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2022. Вип. 17. С. 138-145. URL: [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-7\(17\)-18](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-7(17)-18)
11. Blikharsky Z., Sobol K., Markiv T., Selej dak J. Properties of Concretes Incorporating Recycling Waste and Corrosion Susceptibility of Reinforcing Steel Bars. *Materials*. 2021. N 14(10). 2638. URL: <https://doi.org/10.3390/ma14102638>
12. Barabash I., Harashenko D. Mechanoactivation of Portland cement in the technology of manufacturing the self-compacting concrete. *Eastern-european journal of enterprise technologies*. 2018. N 3/6 (93). pp. 12-17.
13. Ksonshkevych L., Krantovska O., Petrov M., Synii S., Uhl A. Investigation of the structure of cement stone, obtaining and optimization of high-strength concrete on mechanically activated binder. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 230. 03010. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823003010>
14. Ksonshkevych L. M., Barabash I. V., Krantovska O. M., Synii S. V., Sunak P. O. Disperse reinforced concrete with polycarboxylate addition on a mechanically activated binder. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 708. N 1. 012092. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012092>
15. TM Fiber. URL: <https://fiber.ua/uk/fibra-polipropilena-tm-fiber>
16. Sanytsky M., Marushchak U., Olevych Y., Novytskyi Y. Nano-modified ultra-rapid hardening Portland Cement compositions for high strength concretes. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020. Vol. 47. pp. 392-399.
17. Марущак У. Д., Саницький М. А., Королько С. В. Наномодифіковані швидкотверднучі бетони, армовані дисперсними волокнами. *Вісник НУ "Львівська політехніка". Серія: Теорія і практика будівництва*. 2017. № 877. С. 137-143.

ВІМ: ЕФЕКТИВНИЙ ІНСТРУМЕНТ ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦІЇ БУДІВЕЛЬ ТА СПОРУД

BIM: AN EFFECTIVE METHODOLOGY FOR THE RECONSTRUCTION OF BUILDINGS AND STRUCTURES

**Мещерякова О.М., старший викладач, Ясній В.П., д.т.н. доцент,
завідувач кафедри будівельної механіки (Тернопільський
національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль)**

**Meshcheryakova O.M., Senior Lecturer, Iasnii V.P., D. Sc., Associate
Professor, Head of the Department of Structural Mechanics (Ternopil Ivan
Puluj National Technical University, Ternopil)**

Вже зараз постає необхідністю потреба в оцінці доцільності відновлення та реконструкції значної кількості об'єктів в країні. Задля підвищення якості контролю робіт на всіх етапах, зниження вартості будівництва, а головне — підвищення його безпечності актуальним є використання сучасних технологій Будівельного інформаційного моделювання (ВІМ). На сьогодні ВІМ в Україні ще не досить поширений, проте, за досвідом країн ЄС, стає пріоритетом галузевої державної політики. Автоматизоване створення ВІМ моделі для існуючої будівлі означає досягнення оптимізації, яка починається із введення даних (наприклад, хмари точок/зображення/відео/інше) і закінчується готовою моделлю ВІМ, а у проміжних процесах застосовуються напівавтоматичні або автоматизовані методи, що економлять зусилля та час для підвищення ефективності та доцільності прийнятих рішень.

The construction industry, especially in the public sector, faces some commonly recognized issues such as low levels of collaboration, under-investment in technology and research and development as well as poor information management.

It is widely understood that positive returns on investment can be achieved through Building Information Modelling (BIM) implementation. However, most organisations are not familiar with BIM. There is a problem of a low level of implementation of BIM practices in Ukraine. In many countries of the Europe, the use of BIM technologies is mandatory when designing, in particular, high-responsibility and government procurement facilities. In Ukraine, BIM is still used by a few organizations. There is an urgent need to train qualified personnel involved in the construction and management of the urban environment.

Also, the experience of living in a pandemic period (to be prepared for the challenges of contactless transmission of relevant data) shows that the main value and the main tool of the construction industry is the information embedded in the project, which can be shared by all project partners at all stages remotely - from the design of the asset to its maintenance. It is intended to facilitate interoperability between software applications

used in the construction process, to promote digital collaboration between actors in the construction process and to provide a basis for accurate, reliable, repeatable and high-quality information exchange.

Such digital transformation of the public estate and the construction industry is a large change programme requiring resources, a clear plan and a new generation of professionals that effectively interacts with policy makers and civil servants to drive forward. Specialists should keep up with changes in technology.

Ключові слова: BIM, BIM-технології, інформаційне моделювання, проектування, реконструкція.

Keywords: BIM, BIM technologies, information modeling, design, reconstruction.

Вступ. Вже на сьогоднішній день зрозуміло, якою значною є шкода, завдана промисловим та цивільним об'єктам нашої держави, тому цілком очевидно, що найближчим часом важливим та актуальним буде питання оцінки доцільності відновлення цих будівель і споруд. Зрозуміло, що значна їх частина не буде підлягати відновленню та реконструкції, проте певна кількість об'єктів все-таки буде відновлена чи реконструйована з високою ймовірністю за рахунок грантів чи дотацій іноземних партнерів, зокрема Європейського Союзу. Як відомо, кошти ЄС при фінансуванні подібних проектів використовуються ефективно, із застосуванням сучасних методів, процесів та інструментів. Враховуючи світову тенденцію, зокрема досвід ЄС, де все частіше BIM використовується не тільки при створенні нових будівель та споруд, а й при модернізаціях та реконструкціях існуючих об'єктів. Зокрема, у значній частині країн ЄС для об'єктів держзамовлення використання BIM-технологій є обов'язковим. Аналіз проектів реконструкції показує, що необхідно стежити за проектуванням, етапами будівництва та обслуговування. Нові методи проектування не тільки значно спрощують проектування, будівництво та експлуатацію будівлі, але й роблять усі процеси більш ефективними за допомогою BIM [1], [2]. І хоча в Україні впровадження BIM суттєво відстає від світових практик, проте застосування технологій BIM у будівельній сфері останнім часом є пріоритетом галузевої державної політики і BIM-проекування дуже швидко стане невід'ємною частиною української будівельної галузі. Низка прийнятих розпоряджень і стандартів [3], [4] щодо управління інформацією та застосування технологій BIM у будівельній сфері свідчить про те, що вже найближчим часом використання BIM-технологій буде обов'язковою умовою під час проектування та реконструкції об'єктів, в першу чергу – державних, задля підвищення якості контролю робіт на всіх етапах, зниження вартості будівництва, а головне — підвищення його безпечності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Використання BIM-технологій при проектуванні тема не нова, але надзвичайно актуальна. Проте основний фокус є переважно на використанні технології для роботи над новими об'єктами. Впровадження BIM при реконструкції існуючих об'єктів, визначення ефективних методів застосування та виявлення можливих труднощів процесу є актуальною темою для дослідження [5], [6], [7].

За останні кілька десятиліть дослідники розробили численні методи діагностики та прогнозування пошкоджень на основі машинного навчання та штучного інтелекту (ШІ), які систематично розглядалися в останніх найсучасніших статтях. Засоби Моніторингу здоров'я конструкцій (SHM-Structural Health Monitoring) дають змогу оцінити стан конструкцій протягом експлуатації [8], [9].

Метою статті є аналіз практик застосування BIM для роботи з існуючими об'єктами.

Приклади застосування BIM при реконструкціях. В основі поняття BIM лежить не просто 3D-модель будівлі, а інформація, що закладена в кожній складовій частині, кожному елементі цієї моделі. Розумна модель, що є інтелектуальною основою для прийняття рішень, дає змогу аналізувати будівельний об'єкт, задовольняючи потреби різних користувачів, наприклад, – провести аналіз стану конструкцій чи їх пошкоджень, енергетичне моделювання тощо. Основною відмінністю при реконструкції у порівнянні з новими проектами будівництва, є первинний збір даних, який не завжди є якісним, часто – обмеженим через брак інформації. Одне з найбільших обмежень, які існують на даний момент для процесу реконструкції будівель, є збір та інтеграція інформації для подальшого використання. Важливо не тільки мати дані, але вони повинні бути доступними у цифровому форматі, тому що більша частина поточної інформації, в кращому випадку, залишається на папері [10].

Так, при реконструкції промислової будівлі, яка була збудована у 1950-1980 роках у Литві, було встановлено низку типових проблем [11]. До основних, які мають вплив на ефективність і результати проекту, віднесено наступні: документація реконструйованої будівлі застаріла або відсутня; через економію чи брак коштів не виконано техніко-економічне обґрунтування, технічний проект оформлено недбало; довга тривалість процедур закупівель, оскільки кожен проект вирішується за участю кількох учасників; відсутня безперервність інформації, яка може вплинути на подальші рішення; коригування проекту під час будівництва та експлуатації; продовження тривалості проекту та збільшення бюджету. Як показує досвід, ці проблеми можна вирішити, збільшивши особисту компетентність, управління інформацією та за використання BIM у

кожному проекті, тобто, процес реалізації проектів реконструкції повинен базуватися на достовірній інформації, ефективній процедурі та роботі проектної команди, яка базується на методології прийняття рішень та BIM [11], [12].

Автоматизоване створення BIM-моделі для існуючої будівлі означає досягнення оптимізації, яка починається із введення даних (наприклад, хмари точок/зображення/відео/інше) і закінчується готовою моделлю BIM, а у проміжних процесах застосовуються напівавтоматичні або автоматизовані методи, що економлять зусилля та час для підвищення ефективності [7], [13],[7], [14].

Фотограмметрія та лазерне сканування часто використовувалися разом для зйомки складних або великих об'єктів будівлі. Таким чином можна ефективно отримати повні та детальні дані 3D-моделі. Наприклад, ефективну методику збору даних шляхом застосування комплексного геомашичного методу представлено при дослідженні культурної пам'ятки "Conventazzo" в Іспанії (NBIM) [15]. Параметричну модель було побудовано за допомогою різних технік – внутрішньої та зовнішньої фотограмметрії, зйомки дроном, лазерного сканера, інструментарного дослідження із подальшою інтеграцією отриманих даних в єдину модель BIM. Для огляду екстер'єру використовувався БПЛА DJI Mavic Phantom 2, Nikon D750, і лазерний сканер а FARO Focus 3D X 130. Потім отриманий набір фотографічних даних із геоприв'язкою використали, щоб створити першу 3D-модель екстер'єру за допомогою класичного програмного забезпечення Agisopht Metashape. Для визначення ефективності вимірювань проведено порівняння ручного та фотограмметричного вимірювання та результатів лазерного сканування. Різниця у вимірюваннях і відносна точність, як і очікувалося, підкреслила більшу надійність техніки лазерного сканування. Тому на наступних етапах, за винятком хмари точок, отриманої з дрона, використовувалась хмара точок, отримана з лазерного сканера. Обмін даними (між суб'єктами) є критичним у методі BIM. Оптимальним для використання є відкритий формат .ifc (а саме Industry Foundation Classes), що дозволяє обмінюватися даними між програмами.

Використання лазерного сканування дозволяє автоматизувати процес збору інформації про фактичний стан будівель, яку потім можна інтегрувати в бази даних BIM. Традиційні методи документування креслень та отримання інформації про існуючі будівлі все ще будуть присутні, однак саме ефективність і легкість означають, що цей метод був прийнятий як галузевий стандарт [16].

Складністю використання BIM в існуючих будівлях постає те, що будівельні елементи, приховані за іншими елементами, складно відділити від фактичної будівлі (наприклад, системи трубопроводів завжди

розташовуються під декоративним шаром [7]. Дослідниками було запропоновано принципово новий, об'єднаний підхід до реконструкції моделей BIM для MEP (електрика, вентиляція, водопостачання) [17]. У запропонованому методі використовуються два джерела даних, включаючи дані глибинної камери та дані хмар точок LiDAR. Загалом було розглянуто дев'ять типів компонентів, включаючи клапани, насоси, освітлення, каналізаційні труби, двотаврові балки, повітроводи, електричні труби, електричні коробки та розетки. Ці компоненти поділяються на компоненти неправильної форми, компоненти правильної форми та другорядні компоненти, прикріплені до стін. На рис. 1 представлено новий об'єднаний підхід для генерування параметрів BIM для MEP на основі хмар точок LiDAR. Значна автоматизація прослідковується у розробці такого підходу до реконструкції BIM для MEP з поєднанням даних Lidar і глибинних камер, BIM-моделювання виконували у Dynamo в Revit. Результати демонструють хорошу точність реконструйованих компонентів щодо розташування та поз. З точки зору ефективності, загальний час обробки програмою скорочується приблизно на 35% у порівнянні з алгоритмом прямого нарізання завдяки зменшеному діапазону пошуку через використання семантично насиченої 3D-карти. Порівняно з ручним процесом моделювання в програмному забезпеченні, що стосується фотографій і хмар точок, об'єднаний метод реконструкції BIM має більш очевидні переваги [17].

Загальна послідовність BIM для існуючих об'єктів: 1) збір даних за допомогою різних технологій; 2) генерація хмари точок; 3) імпортування та опрацювання хмари точок для напівавтоматичного розпізнавання в середовищі BIM; 4) напівавтоматична генерація елементів BIM; 5) створення моделей для інших компонентів; 6) з'єднання всіх компонентів для створення повної копії. Дані можуть збиратися автоматично з різних джерел і методів, таких як лазерні сканери або камера, інтеграція необроблених даних, розпізнавання будівельних об'єктів і побудова логічних зв'язків між об'єктами все ще виконується вручну. Незважаючи на те, що поки що неможливо повністю автоматизувати перенесення інформації в модель BIM, можна розробити структуру розподілу робіт, де можна спланувати автоматизацію для максимізації ефективності, що полегшує процес і дозволяє уникнути проблем, яке може спричинити ручне моделювання інформації. Вивчення можливостей застосування BIM для існуючих об'єктів при різних типах пошкоджень дасть змогу підвищити якість контролю робіт на всіх етапах і безпеку конструкцій для подальшої експлуатації будівель і споруд.

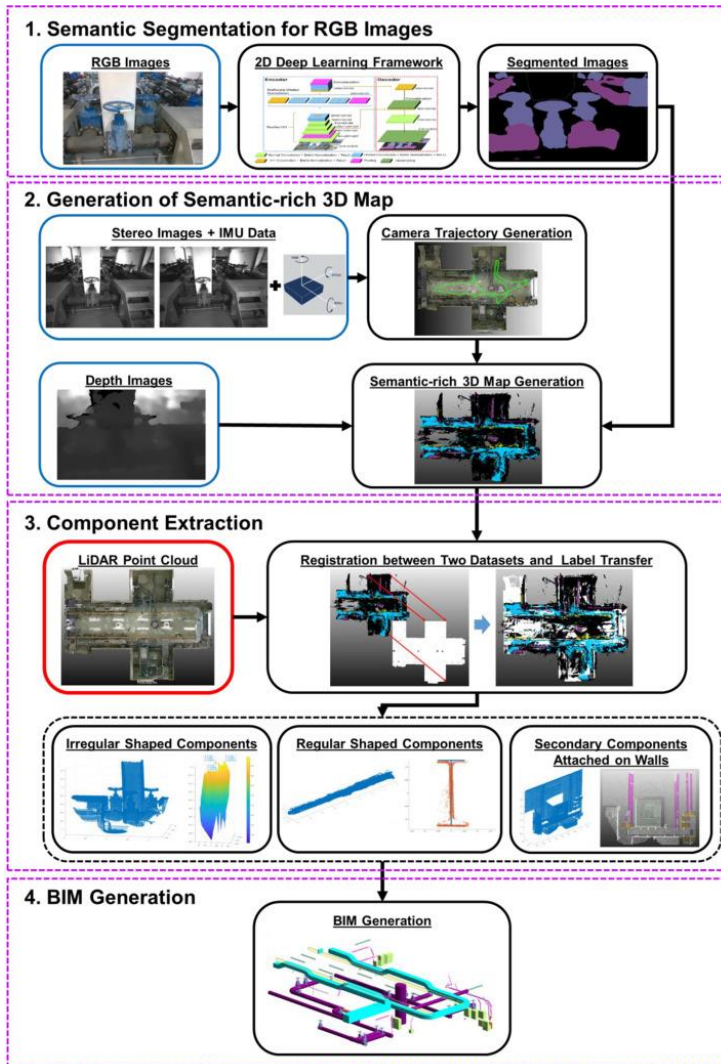


Рис. 1. Підхід до реконструкції із використанням BIM та 3D LiDAR для MEP. Сині прямокутники представляють необроблені дані, зібрані глибинною камерою, а червоні поля представляють вихідні дані, зібрані лазерним сканером [17]

Застосування будівельного інформаційного моделювання при реконструкції об'єктів є актуальною темою і потребує подальшого вивчення.

References

1. L. D'Angelo, M. Hajdukiewicz, F. Seri, and M. M. Keane, 'A novel BIM-based process workflow for building retrofit', *Journal of Building Engineering*, vol. 50, p. 104163, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.job.2022.104163.
2. S. Alirezaei, H. Taghaddos, K. Ghorab, A. N. Tak, and S. Alirezaei, 'BIM-augmented reality integrated approach to risk management', *Autom Constr*, vol. 141, p. 104458, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.autcon.2022.104458.
3. Pro skhvalennia Kontseptsii vprovadzhennia tekhnologii budivelnoho informatsiinoho modeliuвання (VIM-tekhnologii) v Ukraini ta zatverdzhennia planu zakhodiv z yii realizatsii. Kyiv: Kabinet Ministriv Ukrainy, 2021.
4. Tekhnichniy komitet standartyzatsii «Metalobudivnytstvo» (TK 301), DSTU ISO 19650-1:2020 Orhanizatsiia ta otsyfruvannia informatsii shchodo budivel ta sporud vključno z budivelnym informatsiynym modeliuванняm (VIM). Upravlinnia informatsiieu z vykorystanniam budivelnoho informatsiinoho modeliuвання. Chastyna 1. Kontseptsii ta pryntsyipy (ISO 19650-1:2018, IDT). Nakaz vid 18.03.2020 № 73 Pro pryiniattia natsionalnykh standartiv, 2020.
5. Q. Lu and S.H. Lee, 'Comparative analysis of technologies and methods for automatic construction of building information models for existing buildings', in *Proceedings of the ICE HKA Annual Conference 2015*, 2015.
6. B. Bortoluzzi, I. Efremov, C. Medina, D. Sobieraj, and J. J. McArthur, 'Automating the creation of building information models for existing buildings', *Autom Constr*, vol. 105, p. 102838, Sep. 2019, doi: 10.1016/J.AUTCON.2019.102838.
7. R. Volk, J. Stengel, and F. Schultmann, 'Building Information Modeling (BIM) for existing buildings — Literature review and future needs', *Autom Constr*, vol. 38, pp. 109–127, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.autcon.2013.10.023.
8. R. Napolitano, A. Blyth, and B. GLISIC, 'Virtual Environments for Structural Health Monitoring', in *Structural Health Monitoring 2017*, Sep. 2017. doi: 10.12783/shm2017/14031.

9. M. Theiler, K. Dragos, and K. Smarsly, 'BIM-based design of structural health monitoring systems', in Proceedings of the 11th International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford, CA, USA, 2017, vol. 12.
10. Y. Arayici, 'Towards building information modelling for existing structures', Structural Survey, vol. 26, no. 3, pp. 210–222, Jul. 2008, doi: 10.1108/02630800810887108.
11. M. Pavlovskis, D. Migilinskas, J. Antuchevičienė, I. Urba, and V. Zigmund, 'Problems in reconstruction projects, BIM uses and decision-making: Lithuanian case studies', Procedia Eng, vol. 208, pp. 125–128, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.11.029.
12. O. Meshcheriakova, 'Vykylykы tsyfrovoi transformatsii v arkhitekturno-budivelnoi haluzi – VIM spetsialisty, SWorldJournal, no. 13–01, pp. 43–47, May 2022, doi: 10.30888/2663-5712.2022-13-01-025.
13. O Hural O., Iasnii V. (2022) Vykorystannia bezpilotnykh litalnykh aparativ dlia obstezhennia budivel i sporud [Using unmanned aerial vehicle for inspection of buildings and structures]. Proceedings of the International Student Scientific and Technical Conference "Natural Sciences and Humanities. Current Issues" (Tern., 28-29 April 2022), pp. 139-140 [in Ukrainian].
14. R. J. Scherer and P. Katranuschkov, 'BIMification: How to create and use BIM for retrofitting', Advanced Engineering Informatics, vol. 38, pp. 54–66, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.aei.2018.05.007.
15. V. Barrile, E. Bernardo, and G. Bilotta, 'An Experimental HBIM Processing: Innovative Tool for 3D Model Reconstruction of Morpho-Typological Phases for the Cultural Heritage', Remote Sens (Basel), vol. 14, no. 5, p. 1288, Mar. 2022, doi: 10.3390/rs14051288.
16. F. Mellado, P. F. Wong, K. Amano, C. Johnson, and E. C. W. Lou, 'Digitisation of existing buildings to support building assessment schemes: viability of automated sustainability-led design scan-to-BIM process', Architectural Engineering and Design Management, vol. 16, no. 2, pp. 84–99, Mar. 2020, doi: 10.1080/17452007.2019.1674126.
17. B. Wang, Q. Wang, J. C. P. Cheng, C. Song, and C. Yin, 'Vision-assisted BIM reconstruction from 3D LiDAR point clouds for MEP scenes', Autom Constr, vol. 133, p. 103997, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.autcon.2021.103997.

Список використаної літератури

1. L. D'Angelo, M. Hajdukiewicz, F. Seri, and M. M. Keane, 'A novel BIM-based process workflow for building retrofit', *Journal of Building Engineering*, vol. 50, p. 104163, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.jobbe.2022.104163.
2. S. Alirezaei, H. Taghaddos, K. Ghorab, A. N. Tak, and S. Alirezaei, 'BIM-augmented reality integrated approach to risk management', *Autom Constr*, vol. 141, p. 104458, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.autcon.2022.104458.
3. Про схвалення Концепції впровадження технологій будівельного інформаційного моделювання (BIM-технологій) в Україні та затвердження плану заходів з її реалізації. Київ: Кабінет Міністрів України, 2021.
4. Технічний комітет стандартизації «Металобудівництво» (ТК 301), ДСТУ ISO 19650-1:2020 Організація та оцифрування інформації щодо будівель та споруд включно з будівельним інформаційним моделюванням (BIM). Управління інформацією з використанням будівельного інформаційного моделювання. Частина 1. Концепції та принципи (ISO 19650-1:2018, IDT). Наказ від 18.03.2020 № 73 Про прийняття національних стандартів, 2020.
5. Q. Lu and S.H. Lee, 'Comparative analysis of technologies and methods for automatic construction of building information models for existing buildings', in *Proceedings of the ICE HKA Annual Conference 2015*, 2015.
6. B. Bortoluzzi, I. Efremov, C. Medina, D. Sobieraj, and J. J. McArthur, 'Automating the creation of building information models for existing buildings', *Autom Constr*, vol. 105, p. 102838, Sep. 2019, doi: 10.1016/J.AUTCON.2019.102838.
7. R. Volk, J. Stengel, and F. Schultmann, 'Building Information Modeling (BIM) for existing buildings — Literature review and future needs', *Autom Constr*, vol. 38, pp. 109–127, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.autcon.2013.10.023.
8. R. NAPOLITANO, A. BLYTH, and B. GLISIC, 'Virtual Environments for Structural Health Monitoring', in *Structural Health Monitoring 2017*, Sep. 2017. doi: 10.12783/shm2017/14031.
9. M. Theiler, K. Dragos, and K. Smarsly, 'BIM-based design of structural health monitoring systems', in *Proceedings of the 11th International Workshop on Structural Health Monitoring*, Stanford, CA, USA, 2017, vol. 12.

10. Y. Arayici, 'Towards building information modelling for existing structures', *Structural Survey*, vol. 26, no. 3, pp. 210–222, Jul. 2008, doi: 10.1108/02630800810887108.
11. M. Pavlovskis, D. Migilinskas, J. Antuchevičienė, I. Urba, and V. Zigmund, 'Problems in reconstruction projects, BIM uses and decision-making: Lithuanian case studies', *Procedia Eng.*, vol. 208, pp. 125–128, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.11.029.
12. О. Мещерякова, 'Виклики цифрової трансформації в архітектурно-будівельній галузі – BIM спеціалісти', *SWorldJournal*, № 13–01, с. 43–47, 2022, doi: 10.30888/2663-5712.2022-13-01-025.
13. Гураль О. Використання безпілотних літальних апаратів для обстеження будівель і споруд / Гураль О., Ясній В. П. // *Матеріали Міжнародної студентської науково-технічної конференції "Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання"*, 28-29 квітня 2022 р. Т. : ТНТУ, 2022. С. 139–140. (Управління та адміністрування).
14. R. J. Scherer and P. Katranuschkov, 'BIMification: How to create and use BIM for retrofitting', *Advanced Engineering Informatics*, vol. 38, pp. 54–66, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.aei.2018.05.007.
15. V. Barrile, E. Bernardo, and G. Bilotta, 'An Experimental HBIM Processing: Innovative Tool for 3D Model Reconstruction of Morpho-Typological Phases for the Cultural Heritage', *Remote Sens (Basel)*, vol. 14, no. 5, p. 1288, Mar. 2022, doi: 10.3390/rs14051288.
16. F. Mellado, P. F. Wong, K. Amano, C. Johnson, and E. C. W. Lou, 'Digitisation of existing buildings to support building assessment schemes: viability of automated sustainability-led design scan-to-BIM process', *Architectural Engineering and Design Management*, vol. 16, no. 2, pp. 84–99, Mar. 2020, doi: 10.1080/17452007.2019.1674126.
17. B. Wang, Q. Wang, J. C. P. Cheng, C. Song, and C. Yin, 'Vision-assisted BIM reconstruction from 3D LiDAR point clouds for MEP scenes', *Autom Constr.*, vol. 133, p. 103997, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.autcon.2021.103997.

**ЗАСТОСУВАННЯ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ У СИСТЕМАХ
ОПАЛЕННЯ І ГАРЯЧОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ НА ПРИКЛАДІ
МІСТА ЛУЦЬКА**

**APPLICATION OF HEAT PUMPS IN THE HEATING AND HOT
WATER SUPPLY SYSTEMS ON THE EXAMPLE OF THE CITY OF
LUTSK**

Мосійчук І.В., магістр, Ужегова О.А., к.т.н., доц., Ротко С.В., к.т.н., доц., Синій С.В., к.т.н., доц., Пахолюк О.А., к.т.н., доц. (Луцький національний технічний університет)

Mosiichuk I.V., master, Uzhehova O.A., Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Rotko S.V., Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Synii S.V., Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Pakholiuk O.A., Ph.D. in Engineering, Associate Professor (Lutsk National Technical University)

Стаття написана за результатами виконання кваліфікаційної роботи магістра за освітньою програмою «Будівництво та цивільна інженерія». У роботі виконане аналітичне дослідження і техніко-економічні розрахунки використання теплового насосу «повітря-вода» в системі опалення і гарячого водопостачання 9-поверхового житлового будинку в м. Луцьку. Наведено приклади існуючих об'єктів, на яких для потреб систем опалення і гарячого водопостачання впроваджено теплові насоси різних типів та сонячні колектори.

In the work, an analytical study and technical and economic calculations of the use of an air-to-water heat pump in the heating and hot water supply system of a designed 9-story residential building in Lutsk, whose annual need for heat energy for heating and hot water supply is 1110417 kW or 955 Gcal.

Reasoned application of the "air-water" heat pump, as well as a comparison with other sources of heat supply. Taking into account the current tariffs, the annual costs for heating and hot water supply of a 9-story residential building in the city of Lutsk using different heat supply systems were obtained: the use of electric boilers will lead to the highest costs - UAH 1636.4 thousand, the costs will be slightly lower when using central heat supply - 1344.9 thousand UAH, gas boilers give costs of 1218.7 thousand UAH, and heat pumps give the lowest costs - only 555.2 thousand UAH.

The work studied the possibility of using solar collectors. The city of Lutsk is located on the territory where the intensity of solar radiation is 1000 kWh/m²-year. This geographical location of a 9-story residential building makes it possible to only partially use solar energy for heating and hot water supply. 60 solar collectors can be installed on the roof of the designed residential building, which will make it possible to obtain 133950 kW (115.2) Gcal of thermal energy per year, i.e., cover 12% of annual thermal energy needs.

By using a system of solar collectors in combination with other heat supply systems, it is possible to significantly optimize costs for heating and hot water supply. Thus, based on the comparative analysis, we can see that the most cost-effective system for the heating and hot water supply of a 9-story residential building in the city of Lutsk is a system consisting of thermal energy from an air-to-water heat pump in combination with a system of solar collectors. It should also be noted that in the spring-summer period when the most intense solar radiation is observed, the system of solar collectors will be able to provide approximately 95% of the thermal energy needs of a 9-story residential building in the city of Lutsk for hot water supply. In the same spring-summer period, the energy from the system with heat pumps of the "air-water" type can be used by the fan coil system for air conditioning needs.

Taking into account the advantages of using energy from heat pumps and solar collectors for the needs of heating systems and hot water supply, this principle was the basis of real projects implemented in the Volyn and Kherson regions of Ukraine.

Ключові слова: тепловий насос, сонячний колектор, джерела теплопостачання, система опалення, гаряче водопостачання.

Keywords: heat pump, solar collector, sources of heat supply, heating system, hot water supply.

Постановка проблеми. Одним з напрямків впровадження концепцій "Індустрії 4.0" [1], енергоефективності та захисту навколишнього середовища в інженерних мережах є застосування теплових насосів різних типів та сонячних колекторів [2-7 та ін.]. Зокрема, актуальним завданням для України є розширення впровадження такого обладнання у системах опалення і гарячого водопостачання.

Аналіз відомих досліджень і публікацій. Система теплових насосів – екологічно чиста, оскільки тепла енергія отримується з навколишнього середовища – з ґрунту, вододжерел, повітря [3-7 та ін.]. Це сприяє захисту навколишнього середовища і знижує викиди вуглекислого газу. Крім того, впровадження сучасних систем теплових насосів узгоджується із сучасними вимогами підвищення енергоефективності систем опалення та водопостачання, має хороші перспективи для розвитку в Україні [3-9].

Для забезпечення гарячого водопостачання влітку і, в більшій чи меншій мірі, в міжсезоння зручно застосовувати сонячні колектори, які можуть забезпечити отримання практично безкоштовної теплової енергії значну частину року. Такі системи досить надійні і можуть прослужити понад 25 років. Разом з тим для теплопостачання взимку зручно застосовувати конденсаційні газові котли, які зазвичай на 12-15% економніші від турбо- та атмосферних газових котлів за витратою газу. У Європі вже з 2015 року дозволяється використовувати тільки конденсаційні котли, а в Україні ця вимога набрала чинності з серпня 2022 року [10]. Такі технології об'єднують в єдину систему теплогенерації і розподілу енергії зі спільним регулятором. Це дає змогу оптимізувати

витрати енергоносіїв, досягнути значно вищого комфорту і спростити керування системою, створити «розумний будинок».

Мета статті – дослідження застосування теплового насосу «повітря-вода», в тому числі в комплексі з системою сонячних колекторів, в системі опалення і гарячого водопостачання 9-поверхового житлового будинку на прикладі міста Луцька.

Основні завдання: проведення, з аналізом практичних можливостей впровадження в українських реаліях теплових насосів різних типів та сонячних колекторів для потреб систем опалення і гарячого водопостачання, аналітичного дослідження і техніко-економічних розрахунків застосування теплового насосу «повітря-вода» в системі опалення і гарячого водопостачання 9-поверхового житлового будинку в місті Луцьку.

Виклад основного матеріалу. Зважаючи на переваги використання енергії від теплових насосів різних типів та сонячних колекторів для потреб систем опалення та гарячого водопостачання, ці принципи були покладені в основу реальних проєктів, впроваджених у Волинській та Херсонській областях України (рис. 1 – 4).

Завдяки практичному досвіду з проєктування та експлуатації, отриманому на цих та інших об'єктах, встановлено особливості застосування та техніко-економічних розрахунків теплових насосів типів «повітря-вода», «вода-вода» та геотермального для систем опалення та гарячого водопостачання громадських та промислових, житлових будівель, враховуючи їх використання в комплексі з системами сонячних колекторів.

Широкого поширення на вітчизняному ринку систем з тепловими насосами набуло застосування модульних теплових насосів, зокрема – типу flexoTHERM [4], який одержує теплову енергію з повітря і працює до температури -20°C . Тому дана модель прийнята у статті для аналітичних досліджень застосування теплового насосу «повітря-вода» в системі опалення і гарячого водопостачання 9-поверхового житлового будинку на прикладі міста Луцька.

Ефективність теплових насосів характеризує коефіцієнт перетворення енергії COP (coefficient of performance). Він показує кількість теплової енергії, яку продукує тепловий насос, споживаючи 1 кВт·год електричної енергії. Залежно від температури в системі опалення і температури зовнішнього повітря для прийнятого теплового насоса [4] коефіцієнт перетворення енергії COP може досягати 4,8.

Теплові насоси можуть об'єднуватись в одну систему з газовим або електричним котлом та при цьому керуватись спільною системою автоматики, завдяки якій інженерна мережа будівлі може вибирати щоразу найефективнішу та економну технологію живлення.



Рис. 1. Практичний досвід: сонячні колектори і теплові насоси для систем опалення та гарячого водопостачання готелю (м. Луцьк)



Ри. 2. Практичний досвід: сонячні колектори для систем опалення та гарячого водопостачання Новотроїцького масло-сирзаводу (Херсонська область)



Рис. 3. Практичний досвід: геотермальний тепловий насос для опалення та гарячого водопостачання готельного комплексу (Волинська область)



Рис. 4. Практичний досвід: тепловий насос типу «вода-вода» та сонячні колектори для опалення і гарячого водопостачання готельно-ресторанного комплексу (Волинська область)

Найбільшої ефективності використання теплового насоса можна досягти при температурі в системі опалення 30-35°C, застосовуючи панельний обігрів – теплі підлоги, теплі стіни, великоформатні панельні радіатори. Влітку теплові насоси можуть працювати в режимі охолодження для кондиціонування повітря.

Виконаємо техніко-економічне обґрунтування встановлення систем опалення та гарячого водопостачання запроєктованого 9-поверхового житлового будинку в м. Луцьку, спочатку розрахуємо його потребу в тепловій енергії за даними табл. 1.

Таблиця 1

Вхідні параметри для розрахунку потреби в тепловій енергії

Показник	Значення
Загальна площа будівлі, м ²	4649
Температура в будинку, °С	20
Тепловтрати при -14 °С, Вт/м ²	84
Різниця температур	34
Максимальна кількість жителів, люд.	160
Середня кількість жителів, люд.	150
Норма використання гарячої води в добу на 1 люд., л	50
Загальне середнє добове споживання гарячої води, м ³	8

Із врахуванням середньої температури місяців з жовтня по квітень, коли є потреба в опаленні [8], виконано розрахунок питомих теплових втрат кожного місяця, а також визначено помісячні загальні теплові втрати

на весь будинок (табл. 2). У табл. 2 також подано загальну потребу всього 9-поверхового житлового будинку в м. Луцьку в тепловій енергії на опалення та гаряче водопостачання як на кожен місяць окремо, так і на весь рік.

Таким чином, за розрахованими у таблиці 2 даними, річна потреба в тепловій енергії на опалення та гаряче водопостачання становить 1 110 417 кВт (1 110,417 МВт) або 955 Гкал.

Знаючи річну потребу 9-поверхового житлового будинку в тепловій енергії, можна вирахувати загальні витрати на опалення та гаряче водопостачання при використанні:

- системи центрального теплопостачання;
- системи з використанням газових котлів;
- системи з використанням електричних котлів;
- системи з використанням теплових насосів типу «повітря – вода».

Для розрахунків потреби в тепловій енергії скористаємось параметрами, наведеними в таблицях 2 та 3.

Таблиця 2

Розрахунок місячних і річної потреби в тепловій енергії 9-поверхового житлового будинку на опалення та гаряче водопостачання

Місяць	Теплові втрати, Вт·год/м ²	Теплові втрати загальні, кВт·год/м ²	Потреба в тепловій енергії на опалення і гаряче водопостачання, кВт
Липень	-	-	5580
Серпень	-	-	5580
Вересень	-	-	5400
Жовтень	26,5	123,2	91661
Листопад	51,6	239,9	172728
Грудень	56,7	263,6	196118
Січень	61,2	284,5	211668
Лютий	53,9	250,6	168403
Березень	44,7	207,8	154603
Квітень	26,2	121,8	87696
Травень	-	-	5580
Червень	-	-	5400
Всього			1 110 417

Таблиця 3

Технічні параметри обладнання для опалення та гарячого водопостачання

Показник	Значення
Теплотворна здатність газу, кВт/м ³	8
ККД теплового насосу типу «повітря – вода», к	2,8
ККД електричного котла, к	0,95
ККД газового котла, к	0,91

Враховуючи річну потребу в тепловій енергії на опалення та гаряче водопостачання, яка становить 1 110 417 кВт або 955 Гкал, та дані табл. 3, визначаємо вартість енергоносіїв на опалення та гаряче водопостачання (табл. 4). Тарифи на електроенергію – 1,68 грн./кВт·год, на газ – 7,99 грн./м³, на теплову енергію – 1408,27 грн./ Гкал, взято з відкритих джерел.

При умові тепlopостачання протягом року від центральної котельні, знаючи діючий тариф на теплову енергію 1 Гкал = 1408,27 грн. (взято з відкритих джерел), можна визначити, що розрахункова вартість опалення та гарячого водопостачання 9-поверхового житлового будинку в м. Луцьку становить: 955 Гкал × 1408,27 грн. = 1344897,8 грн.

Таблиця 4

Вартість енергоносіїв на опалення та гаряче водопостачання
9-поверхового житлового будинку в рік

Тарифи на електроенергію, грн/кВт·год	1,68	
	при одностарифному лічильнику	при двотарифному лічильнику *
Тепловий насос, грн.	666250	555208
Електричний котел, грн.	1963685	1636404
Тарифи на газ, грн/м ³	7,99	
Газовий котел, грн.	1218713	

* при двотарифному лічильнику електроенергії 9-поверховий житловий будинок може використовувати електроенергію для опалення та гаряче водопостачання з 23:00 до 7:00 з коефіцієнтом 0,5 від діючого тарифу, тобто 33,3 % роботи обладнання може працювати за пільговим тарифом (0,84 грн./кВт·год) при нормативному тарифі 1 грн. 68 коп. за 1 кВт·год.

У табл. 5 наведено витрати 9-поверхового житлового будинку в м. Луцьку на опалення та гаряче водопостачання, розраховані з використанням різних джерел теплопостачання.

Таблиця 5

Витрати на опалення та гаряче водопостачання з використанням різних джерел теплопостачання

Джерело теплопостачання	Вартість за рік, грн.
Електричний котел	1636404
Централізоване теплопостачання	1344898
Газовий котел	1218713
Тепловий насос	555208

Розрахуємо ефективність використання сонячних колекторів для часткового покриття потреби 9-поверхового житлового будинку в м. Луцьку в тепловій енергії.

Географічне розташування 9-поверхового житлового будинку дає можливість лише частково використовувати сонячну енергію для теплопостачання та гарячого водопостачання. Місто Луцьк розташоване на території, де інтенсивність сонячного випромінювання становить $1000 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2 \cdot \text{рік}$.

Для розрахунку перетворення сонячної енергії на теплову використовуємо поширені на вітчизняному ринку плоскі сонячні колектори моделі augoTHERM [4], зокрема – типу VFK 150 V (ефективна площа $2,35 \text{ м}^2$, відсоток поглинання, $\alpha=95\%$). На даху розглядуваного 9-поверхового житлового будинку існує можливість розміщення 60-ти таких колекторів. Тому, тепла енергія, яку можна отримати за допомогою системи з цих сонячних колекторів за рік становить: $Q_{\text{ск}} = 60 \times 2,35 \times 1\,000 \times 0,95 = 133950 \text{ кВт}$ або $115,2 \text{ Гкал}$.

Отже, враховуючи дані табл. 2, застосування системи сонячних колекторів може покрити близько 12 % річних потреб в тепловій енергії на опалення та гаряче водопостачання 9-поверхового житлового будинку у м. Луцьку.

Використовуючи систему сонячних колекторів в комплексі з іншими джерелами теплопостачання можна отримати річні витрати, подані в табл. 6.

Таблиця 6

Витрати на опалення та гаряче водопостачання з використанням різних джерел теплопостачання в комплексі з системою сонячних колекторів

Джерело теплопостачання	Вартість за рік, грн.
Електричний котел + Система сонячних колекторів	1529244
Централізоване теплопостачання + Система сонячних колекторів	1237738
Газовий котел + Система сонячних колекторів	1111553
Тепловий насос + Система сонячних колекторів	448048

Висновки. Практичний досвід з проектування та експлуатації систем опалення та гарячого водопостачання громадських та промислових, житлових будівель підтвердив перспективність розвитку застосування у схемах цих систем теплових насосів типів «повітря-вода», «вода-вода» та геотермального та їх використання в комплексі з системами сонячних колекторів, в тому числі – для географічних та інших техніко-економічних умов Волинської області.

Також, на основі проведеного порівняльного аналізу бачимо, що найефективнішою за вартістю системою теплопостачання для опалення та гарячого водопостачання 9-поверхового житлового будинку у місті Луцьку виявилась система, яка складається з теплової енергії від теплового насоса типу «повітря-вода» в комплексі з системою сонячних колекторів. Поступове зниження вартості обладнання (теплових насосів, сонячних колекторів) збільшує обсяги його використання у вітчизняному будівництві та підвищує конкуренцію серед його виробників.

Також слід зазначити, що у весняно-літній період, коли спостерігається найінтенсивніше сонячне випромінювання, система з сонячних колекторів зможе орієнтовно на 95 % забезпечити потреби 9-поверхового житлового будинку у місті Луцьку в тепловій енергії на гаряче водопостачання. У цей же весняно-літній період енергія від системи з тепловими насосами типу «повітря-вода» може використовуватися системою фанкойлів для потреб кондиціонування приміщень.

References

1. Hermann M., Pentek T., Otto B. Design principles for industrie 4.0 scenarios. *49th Hawaii international conference on system sciences (HICSS)*. 2016. pp. 3928-3937. URL: <https://doi.org/10.1109/HICSS.2016.488>
2. Synii S. V. Napriamky rozvytku tekhnolohii monitorynhu v systemakh vodopostachannia mista Lutska. *Suchasni tekhnolohii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi*. 2017. Vyp. 7. S. 227-232.

3. Kuts H. O., Stanytsina V. V., Kobernyk V. S. Porivnialna otsinka vartosti teplovoi enerhii vid diuchykh ta prohnzovanykh teploheneruiuchykh dzherel dlia system teplopостachannia krainy. Problemy zahalnoi enerhetyky. 2016. Vyp. 3 (46). S. 12-18.4. Vaillant. URL: <https://www.vaillant.ua/>
5. Panasonic. URL: <https://panasonic.net.ua/ua>
6. Mitsubishi Electric. URL: <https://www.mitsubishi-aircon.com.ua/>
7. Viessmann. URL: <https://www.viessmann.ua/>
8. DSTU B A.2.2-12:2015. Enerhetychna efektyvnist budivel. Metod rozrakhunku enerhospozhyvannia pry opalenni, okholodzhenni, ventyliatsii, osvittlenni ta hariachomu vodopostachanni. Chynnyi vid 2016-01-01. Vyd. ofits. Kyiv : Minrehion Ukrainy, 2015.
9. Protsenko S. B., Novytska O.S., Kizieiev M. D. Osoblyvosti novoi metodyky rozrakhunku proektnoho teplovoho navantazhennia system opalennia budivel za DSTU EN 12831-1:2017. Suchasni tekhnolohii, materialy i konstruktssii v budivnytstvi. 2019. T.25. №2. S.140-144. URL: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2018-2-140-144>
10. Tekhnichniy rehlament vodohriinykh kotliv, shcho pratsiuut na ridkomu chy hazopodibnomu palyvi: Postanova KM Ukrainy vid 27.08.2008 r. № 748. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/748-2008-n#Text>

Список використаної літератури

1. Hermann M., Pentek T., Otto B. Design principles for industrie 4.0 scenarios. 49th Hawaii international conference on system sciences (HICSS). 2016. pp. 3928-3937. URL: <https://doi.org/10.1109/HICSS.2016.488>
2. Синій С. В. Напрямки розвитку технологій моніторингу в системах водопостачання міста Луцька. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2017. Вип. 7. С. 227-232.
3. Куц Г. О., Станиціна В. В., Коберник В. С. Порівняльна оцінка вартості теплової енергії від діючих та прогнозованих теплогенеруючих джерел для систем теплопостачання країни. *Проблеми загальної енергетики*. 2016. Вип. 3 (46). С. 12-18.
4. Vaillant. URL: <https://www.vaillant.ua/>
5. Panasonic. URL: <https://panasonic.net.ua/ua>
6. Mitsubishi Electric. URL: <https://www.mitsubishi-aircon.com.ua/>
7. Viessmann. URL: <https://www.viessmann.ua/>
8. ДСТУ Б А.2.2-12:2015. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та гарячому водопостачанні. Чинний від 2016-01-01. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2015.
9. Проценко С. Б., Новицька О.С., Кізеєв М. Д. Особливості нової методики розрахунку проектного теплового навантаження систем опалення будівель за ДСТУ EN 12831-1:2017. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2019. Т.25. №2. С.140-144. URL: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2018-2-140-144>
10. Технічний регламент водогрійних котлів, що працюють на рідкому чи газоподібному паливі: Постанова КМ України від 27.08.2008 р. № 748. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/748-2008-n#Text>

**ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДІАГНОСТИКИ
КОРОЗІЙНОГО СТАНУ ПІД ЧАС РЕКОНСТРУКЦІЇ МОСТОВИХ
СПОРУД**

**ENGINEERING AND TECHNICAL PROVISION OF CORROSION
DIAGNOSTICS DURING THE RECONSTRUCTION OF BRIDGE
STRUCTURES**

**Онищенко А. М. д.т.н., проф., Гібаленко О.М., д.т.н., проф.,
Чиженко Н.П., к.т.н., Карнаков І.А., асп. (Національний транспортний
університет)**

**Onyshchenko A. M., Doctor of Technical Science, Professor,
Gibalenko O.M., Doctor of Technical Science, Professor, Chyzenko N.P.,
Ph.D. in Engineering, Karnakov I. A., postgraduate (National Transport
University)**

Діагностика технічного стану металоконструкції мостових споруд, експлуатація яких відбувається у корозійно-агресивних середовищах промислових підприємств, обумовлює необхідність розвитку методичного підходу, який забезпечує комплексний облік параметрів дійсного стану споруд і факторів режиму експлуатації. Структурний опис процесу діагностики стану будівель за критерієм забезпечення заходів первинного та вторинного захисту від корозії дозволяє здійснити виконання програми реконструкції на основі технічного моніторингу.

Diagnostics of the technical state of metal structures of bridge structures, the operation of which takes place in corrosive and aggressive environments of industrial enterprises, necessitates the development of a methodical approach that provides a comprehensive account of the parameters of the actual state of the structures and factors of the operating mode. The structural description of the process of diagnosing the condition of buildings based on the criterion of providing measures of primary and secondary protection against corrosion allows the implementation of the reconstruction program based on technical monitoring. Diagnosing the technical condition of metal structures requires taking into account the influence of various operational and production factors to determine the actual condition and predict the service life. The specifics of the implementation of the program of technical diagnostics of the corrosion state is that bridge structures in general and their separate parts are considered in a state of dynamic equilibrium, and the main signs of the danger of an emergency are the appearance of deformation of the structure or its structures. At the same time, the object can be characterized by many states that require a detailed description and account of their interaction. The main task of the research is the description of the inspection procedure and then determine the current state of the bridge structure.

The developed approach determines the sequence of measures to extend the residual resource using the probabilistic-physical method of reliability analysis, which includes the quantitative assessment of reliability indicators based on the results of expert diagnostics and the results of physicochemical and mathematical modeling of corrosion destruction during accelerated and bench tests. Determining the remaining resource and making a decision on the further operation of the object is carried out by the established patterns of changes in parameters obtained during the analysis of the mechanisms of damage development and based on the results of the determination of functional indicators.

Ключові слова: мостові споруди, металоконструкції, корозійне зношування, первинний і вторинний захист від корозії, діагностика, технічний стан, реконструкція.

Keywords: bridge structures, metal structures, corrosion wear, primary and secondary protection against corrosion, diagnostics, technical condition, reconstruction.

Вирішення завдань, пов'язаних із організацією системи оцінки технічного стану металоконструкцій мостів, становить основу технічної діагностики, спрямованої на забезпечення виконання робіт з ремонту та посилення металоконструкцій, виходячи з вимог забезпечення їх міцності, жорсткості та стійкості [1]. Оцінка експлуатаційної надійності будівель і споруд загалом, і навіть окремих конструктивів, вузлів і елементів з вимог використання загальних принципів технічної діагностики, здійснюється шляхом реалізації програми моніторингу технічного стану. Найважливішою умовою виконання робіт є організація системного обстеження, оцінка стану первинного та вторинного захисту від корозії; проведення прискорених корозійних випробувань зразків протикорозійних матеріалів, моделей та елементів конструкцій; виконання лабораторних і стендових випробувань систем лакофарбових покриттів; визначення необхідних характеристик міцності, параметрів жорсткості, стійкості як окремих конструкцій, так і споруд в цілому [2].

Постановка проблеми. Для виконання моніторингу технічного стану мостових споруд у процесі їх зведення, реконструкції, ремонту та експлуатації необхідно виконати сукупність цілеспрямованих дій при виконанні технічної діагностики з використанням неруйнівних методів контролю, заснованих на новітніх досягненнях науки та техніки [3]. Питання діагностики технічного стану металоконструкцій вимагають урахування впливу різних експлуатаційно-виробничих факторів для визначення дійсного стану та прогнозування терміну служби [4, 5].

Проблеми, відображені у дослідженні. Специфіка виконання програми робіт із технічної діагностики корозійного стану полягає в тому, що мостові споруди загалом та їх окремі частини розглядаються у стані динамічної рівноваги, а основними ознаками небезпеки виникнення аварійної ситуації є поява деформації споруди або її окремих конструкцій.

При цьому об'єкт може характеризуватись безліччю станів, що потребують детального опису та обліку їхньої взаємодії.

Ціль публікації. Основним завданням дослідження є опис процедури перевірки, визначення стану, в якому споруди моста знаходиться в даний час. З цією метою розглянуті методи реалізації перевірки – програмний і апаратний. Засобами реалізації програмного методу перевірки виступають робочі експертні процедури та спеціально створені тестові прийоми. Апаратний спосіб полягає у використанні для діагностики вбудованих, стаціонарних чи зовнішніх, мобільних технічних засобів. У практиці діагностики технічного стану застосовуються обидва способи спільно, тому що результат впливів за заданою програмою не може бути замінений використанням апаратного або приладового забезпечення.

Справжній стан споруди моста представляється структурною схемою, яка визначає стан у кожний момент часу t значеннями вхідних - X_i , внутрішніх - Y_i та вихідних - Z_i координат, при цьому вхідні та внутрішні - змінні, а вихідні - функції. Графічне представлення процесу діагностики під час виконання процедури моніторингу корозійного стану представлено на рис 1.

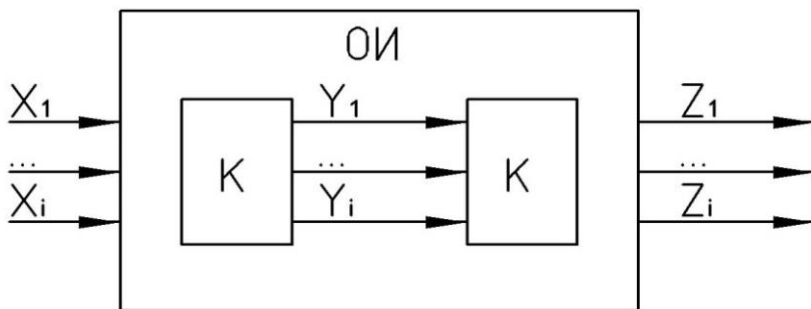


Рис. 1. Схема процесу діагностики корозійного стану мостової споруди

Умовний розподіл об'єкта дослідження (ОИ) на компоненти пов'язаний з низкою об'єктивних умов і суб'єктивних передумов. Як компоненти K вибираються конструкції, деталі, вузли, які складають окремі самостійні системи або елементи (покриття, перекриття, стінове огороження, каркас будівлі або інженерно-технологічне обладнання, оснащення тощо). Об'єкт контролю як логічна система може бути заданий графічно, аналітично, таблично, фізичною моделлю або іншою віртуальною формою, зручною для обробки методами комп'ютерно-інженерної технології.

Незалежно від форми компонента K повинні бути визначені вихідні дані та внутрішні вхідні стани. Побудова програми перевірки вимагає аналізу структури об'єкта дослідження як у справному, так і у несправному

станах первинного і вторинного захисту від корозії. Формалізація процесу аналізу обумовлює необхідність опису можливих дефектів, пошкоджень, недосконалостей об'єкта, отриманих у результаті експлуатації або на стадіях проектування та виготовлення, які, у свою чергу, визначаються несправностями складових елементів.

Аналіз структурної схеми за наявності несправностей спрощується, якщо заздалегідь відомі функції, що реалізуються компонентами з несправностями. Для визначення цих функцій у справний компонент навмисно вводиться несправність. Введення та визначення вхідних функцій несправних компонентів відбувається шляхом перерахування можливих несправностей (дефекти та пошкодження захисних покриттів, зміна геометричних характеристик у результаті корозійного зносу, фактори агресивності середовища, значення корозійної стійкості конструктивної форми та матеріалу) або визначення логічних несправностей компонента (деформація огорожувальних та осадових явищ – деформації несучих конструкцій, збільшення технологічного навантаження тощо).

Умовно, об'єкт описується станом з L компонентів. Якщо S_i - число можливих поодиноких несправностей j -го компонента, то загальна кількість M - можливих несправностей об'єкта контролю буде:

- при поодиноких несправностях (один несправний компонент має одну несправність):

$$M1 = \sum_{j=1}^L S_j \quad (1)$$

- при поодиноких несправностях компонентів та кратних несправностях об'єкта (один або кілька несправних компонентів мають по одній несправності):

$$M2 = \prod_{i=1}^L (1 + S_j) - 1 \quad (2)$$

- при кратних несправностях компонента та кратних несправностях об'єкта (один несправний компонент має одну несправність):

$$M3 = 2^{M1} - 1 \quad (3)$$

Якщо відома технологічна функція, що реалізується справним об'єктом, визначені можливі несправності об'єкта і реалізовані при цьому функції, а також спосіб проведення діагностики стану первинного та вторинного захисту від корозії, то складається таблиця функцій

несправностей, при цьому приймаються наступні умовні позначення (таблиця 1).

Таблиця 1

Функції несправностей			
R	E		
	f ₀	f _i	f _M
t ₁	r ₀₁	r _{j1}	r _{M1}
...
t _j	r _{0j}	r _{ij}	r _{Mj}
t(T)	r _{0(T)}	r _{1(T)}	r _{M(T)}

де: E - безліч функцій, що реалізуються всіма справними та несправними об'єктами;

f₀, f_i - функція реалізована справним і несправним об'єктом ;

f_M - Функція реалізована об'єктом з M несправностями;

R – множина результатів окремих досліджень об'єктів;

T – безліч, у якому задана функція, реалізована справним об'єктом;

t_{j(T)} - окремі дослідження (експерименти) на об'єкті;

r_{ij(R)} - результати експериментів.

При розбитті множини E на непересічні та непусті підмножини, можна виділити три характерні групи:

- число підмножин дорівнює двом при цьому одне з них містить єдиний елемент - справний об'єкт, а друге - всі і - несправні об'єкти. Така умова відповідає процедурі перевірки працездатного стану об'єкта;

- число множин на одне більше числа компонентів структури об'єкта, при цьому одна множина містить справний об'єкт, а в будь-яке з інших входять тільки ті - несправні об'єкти, яким відповідають несправності одного, зіставленому даному безлічі компонента.

- число підмножин дорівнює числу елементів множини E.

Таке структурне подання діагностики стану заходів щодо первинного та вторинного захисту металоконструкцій мостових споруд від корозії відповідає умовам локалізації з деталізацією щодо кожної певної несправності. Слід зазначити, що з діагностики, зазвичай, виходять із вирішення приватних завдань визначення стану окремих конструкцій та її наближення до граничного, не враховуючи впливу тих чи інших несправностей і технічного об'єкта загалом.

Аналіз даних за результатами технічного діагностування стану металоконструкцій кранової естакади виробничої ділянки металургійного заводу (рис.2.) в умовах агресивних впливів дозволив зробити висновок, що виявлені недосконалості первинного та вторинного захисту (рис. 3),

інтенсивний розвиток корозійних процесів (рис. 4) обумовлено невідповідністю технологічних параметрів, навантаженості об'єкта умовам експлуатації та системи технічного обслуговування.

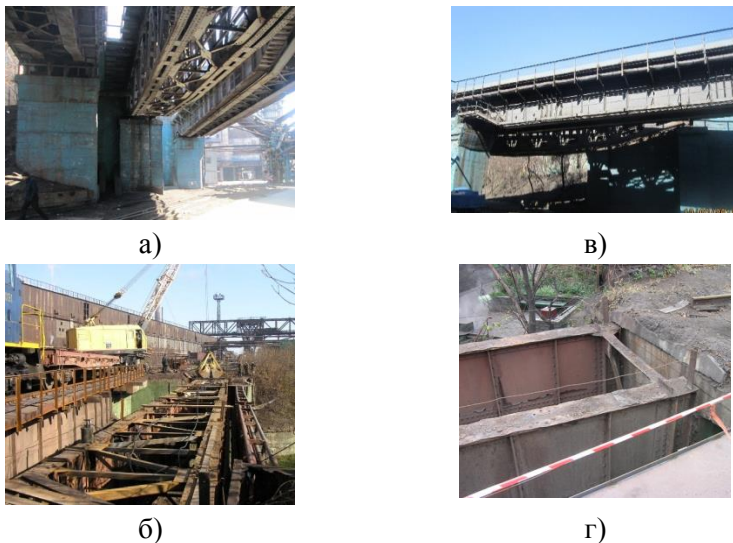


Рис. 2. Корозійний стан несучих конструкцій моста під час виконання реконструкції прогонової споруди: а) загальний вигляд моста; б) монтажні роботи при реконструкції; в) боковий вигляд споруди; г) руйнування підкранових конструкцій

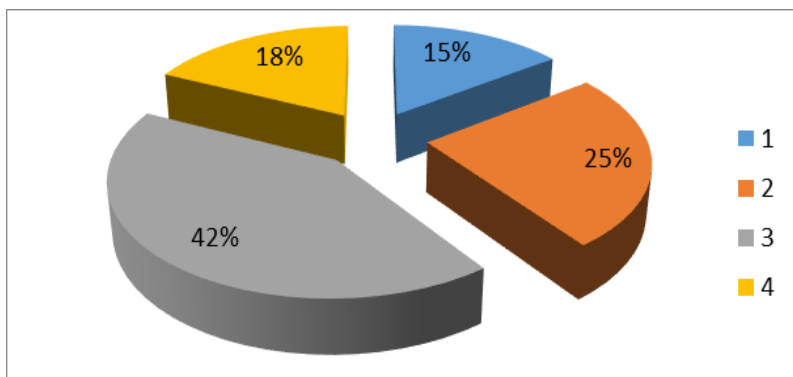


Рис.3. Виявлені недосконалості конструкцій за критерієм первинного захисту: 1 - утворення застійних зон і місць скупчення вологісно-пилкових виділень; 2 - нераціональне вузлове з'єднання елементів колон

При експертному діагностуванні корозійного стану конструкцій не завжди однозначно вдається визначити всі фактори, що впливають на перебіг технологічних процесів та оцінити характер їх впливу на якість експлуатації об'єкта, що викликає необхідність створення єдиної методики аудиту металоконструкцій [6].

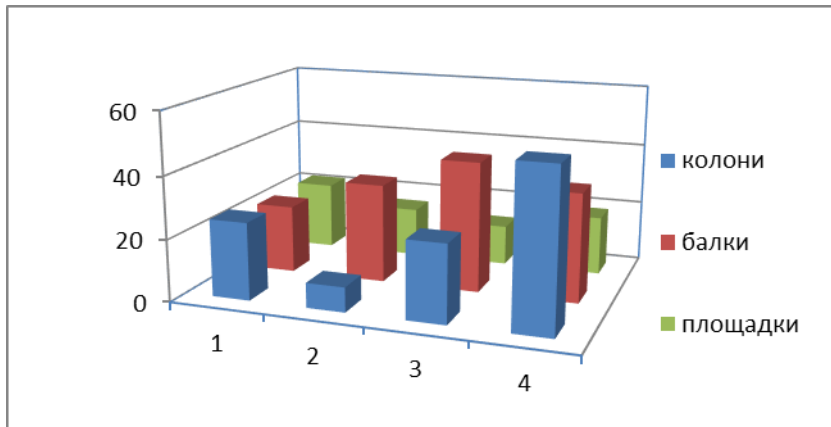


Рис. 4. Кількісні характеристики несправностей (у %):

- 1 – втрата перерізу основних елементів конструкцій,
- 2 – руйнування болтових з'єднань та руйнування зварних швів;
- 3 – втрата стійкості при зміні геометричних характеристик;
- 4 – руйнування лакофарбового покриття

Висновки. Найважливішою умовою реалізації програми діагностики технічного стану споруд мостів, а також їх окремих конструктивних елементів є організація їх системного обстеження, лабораторного та натурного випробування матеріалів, визначення характеристик міцності, параметрів жорсткості та стійкості як окремих конструкцій, так і споруди в цілому.

Розроблений підхід визначає послідовність заходів продовження залишкового ресурсу з використанням імовірно-фізичного методу аналізу надійності, що включає кількісну оцінку показників надійності на основі результатів експертного діагностування та результати фізико-хімічного та математичного моделювання корозійного руйнування при прискорених і стендових випробуваннях. Визначення залишкового ресурсу та прийняття рішення про подальшу експлуатацію об'єкта здійснюється згідно зі встановленими закономірностями зміни параметрів, отриманими при аналізі механізмів розвитку пошкоджень, і за результатами визначення функціональних показників.

References

1. DBN V.1.2-9-2008. Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnykh ob'ektiv. Osnovni vymohy do budivel ta sporud. Bezpeka ekspluatatsii. – Minrehion Ukrainy. 21 s.
2. DBN V.1.2-14-2008 RNBB. Zahalni pryntsyipy zabezpechennia bezpeky nadiinosti ta konstruktivnoi bezpeky budivel, sporud, budivelnykh konstruktsii ta osnov. – Minrehion Ukrainy. 43s.
3. ISO 9223:2012 Corrosion of metals and alloys — Corrosivity of atmospheres — Classification, determination and estimation Number of pages: 15.
4. Gibalenko A. Design requirements to structural steel durability based on level of industrial facility corrosion hazard / A Gibalenko, V Korolov, J Filatov // AKTUALNE PROBLEMY KONSTRUKCJI METALOWYCH. 2014, Gdańsk Poland. P. 98-102.
5. Estimation of steel structure corrosion risk level / V. P. Korolov, Y. Vysotsky, O. M. Gibalenko, P. V. Korolov // Eurocorr-2010. The European Corrosion Congress (13.09-17.09.2010) / From the Earth`s Depths to Space Heights. – Moscow, 2010. Book of Abstracts. 534 p.
6. American Rust Standard Guide. New York: American Institute for Steel Classification. American rust standard guide. New York: American Institute for Steel Classification, c. 1968 (OCoLC)746104088, Media Type: Book. Publisher: American Institute for Steel Classification. Publish Date: 31/12/2002. Code ID: 24016. Pages: 12.

Список використаної літератури

1. ДБН В.1.2-9-2008. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Основні вимоги до будівель та споруд. Безпека експлуатації. – Мінрегіон України. 21 с.
2. ДБН В.1.2-14-2008 РНББ. Загальні принципи забезпечення_безпеки надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. – Мінрегіон України. 43с.
3. ISO 9223:2012 Corrosion of metals and alloys — Corrosivity of atmospheres — Classification, determination and estimation Number of pages: 15.
4. Gibalenko A. Design requirements to structural steel durability based on level of industrial facility corrosion hazard / A Gibalenko, V Korolov, J Filatov // AKTUALNE PROBLEMY KONSTRUKCJI METALOWYCH. 2014, Gdańsk Poland. P. 98-102.
5. Estimation of steel structure corrosion risk level / V. P. Korolov, Y. Vysotsky, O. M. Gibalenko, P. V. Korolov // Eurocorr-2010. The European Corrosion Congress (13.09-17.09.2010) / From the Earth`s Depths to Space Heights. – Moscow, 2010. Book of Abstracts. 534 p.
6. American Rust Standard Guide. New York: American Institute for Steel Classification. American rust standard guide. New York: American Institute for Steel Classification, c. 1968 (OCoLC)746104088, Media Type: Book. Publisher: American Institute for Steel Classification. Publish Date: 31/12/2002. Code ID: 24016. Pages: 12.

УДК 665.775+539.612

**ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ АДГЕЗІЙНИХ ДОБАВОК НА БІТУМИ
РІЗНОГО СТРУКТУРНО-РЕОЛОГІЧНОГО ТИПУ**

**FEATURES OF THE INFLUENCE OF ADHESIVE PROMOTERS ON
BITUMEN OF DIFFERENT STRUCTURAL AND RHEOLOGICAL
TYPES**

**Пиріг Я.І., к.т.н., с.н.с., Галкін А.В., к.т.н. (Харківський
національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків)**

**Pyrig Y.I., Ph.D. in Engineering, S. Researcher, Galkin A.V., Ph.D. in
Engineering (Kharkov National Automobile and Highway University,
Kharkov)**

В статті розглянуто особливості впливу поширеної в Україні адгезійної добавки Wetfix BE на властивості в'язких дорожніх бітумів, що застосовуються для приготування асфальтобетонних сумішей. На основі отриманих даних встановлено різницю впливу адгезійної добавки на стандартні показники якості та зміну властивостей після старіння бітумів різного структурно-реологічного типу.

Improving in the physical and mechanical characteristics of pavement bitumens and increasing the durability of asphalt pavements is reachable within the modification of bituminous binders with various promoters, including adhesive ones. In recent years, the geography of countries supplying pavement bitumen for Ukraine has changed significantly and both oxidized and distillation binders have been widely used. In this regard, the matter of researching the changes in the properties of bitumen used in the road industry of Ukraine under the influence of various modifiers, in particular, adhesive promoters, becomes relevant. The purpose of the work is to track the influence of the adhesive promoter Wetfix BE on the properties of petroleum pavement bitumens used in the road industry of Ukraine. To achieve this purpose in the presented study: experimentally obtained standard indicators of the quality of domestic and imported from various European countries to Ukraine petroleum pavement bitumen; the effect of the chosen adhesive promoter on the adhesion of bitumen to the glass surface is determined; the change in the properties of bituminous binders after aging according to the RTFOT method is estimated. With the obtained data, it was found that the Wetfix BE promoter changes the bitumen properties different ways depend on their structural type. In contrast to oxidized bitumens, for the distillation bitumens the use of the Wetfix BE promoter results in plasticization of the binder to a greater extent, the closer the bitumen is to the "sol" type in terms of structural and rheological type. The Wetfix BE promoter slows down the change in the properties of the oxidized bitumens after aging by the RTFOT method, while heating of the distillation bitumens with the same promoter

removes plasticization effect. In order to achieve the same level of increase in the adhesion of bitumen to the surface of mineral materials in asphalt mixtures, the concentration of the Wetfix BE promoter should be slightly higher in oxidized bitumen, which in terms of structural and rheological type is close to the "gel" type. Before using adhesive promoters, it is necessary to take into account the structural and rheological type of bitumen, which will allow to assess the expediency of using this promoter and the specifics of its influence on the properties of bitumen.

*Ключові слова: бітум, зчеплюваність, адгезійна добавка, старіння.
Keywords: bitumen, adhesion, adhesion promoter, ageing.*

Вступ. Однією з основних причин передчасного руйнування асфальтобетонних покриттів автомобільних доріг України є низька якість дорожніх бітумів. Низька когезійна міцність, підвищена схильність до зміни властивостей після старіння, недостатня зчеплюваність бітуму з поверхнею кам'яних матеріалів позначається на довговічності асфальтобетонних покриттів. Ефективним засобом поліпшення фізико-механічних характеристик дорожніх бітумів та підвищення довговічності асфальтобетонних покриттів є модифікація бітумних в'язучих різноманітними добавками, в тому числі й адгезійними добавками, що сприяють підвищенню зчеплюваності бітумів з поверхнею кам'яних матеріалів складових асфальтобетонів.

Аналіз публікацій

Ранні роботи, присвячені дослідженню зчеплюваності бітумів з кам'яними матеріалами, датуються 20 – 30-ми роками минулого століття, а широкое застосування адгезійних добавок для покращення зчеплюваності бітумних в'язучих було розпочато в 50-х роках [1 – 4].

На даний час в дорожній галузі України використовуються різноманітні за хімічним складом (на основі амінів, поліамінів, амідоамінів, органосиланів, поліфосфорної кислоти тощо) і ефективністю як вітчизняні, так і імпортовані адгезійні модифікатори.

На жаль, досконалі дослідження ефективності покращення властивостей бітумних в'язучих (головним чином зчеплюваності бітумів із кам'яними матеріалами, що використовуються у вітчизняній дорожній галузі) в Україні не проводяться. Певним виправдуванням цьому є те, що довгий час використовувалися лише бітуми, виготовлені за технологією окислення з переважно російської нафти [5]. З початком у 2020 р. урядової програми «Велике будівництво» виникла нагальна потреба в значному обсязі нафтового дорожнього бітуму. Враховуючи те, що приготування бітумів в Україні здійснюється, головним чином, на підприємстві ПАТ «Укртатнафта», яке не в змозі забезпечити в повному обсязі попит на дорожні бітуми, переважна кількість бітуму в Україну імпортується.

Починаючи з 2020 р., значно розширилась географія країн-

постачальників дорожнього бітуму. Якщо до 2020 р. основним імпортером бітуму в Україну була Республіка Білорусь, то з реалізацією програми «Велике будівництво» набула поширення практика імпорту бітумного в'язучого морським транспортом із низки європейських країн – Греції, Італії, Іспанії, Туреччини (загальний обсяг імпорту морським транспортом у 2020 р. склав 128 тис. т). У 2021 р. ця тенденція посилилась і в Україну було імпортовано морським транспортом 267 тис. т в'язучого, головним чином, з Греції, Італії та Азербайджану [6].

Беручи до уваги те, що для виготовлення європейських бітумів використовується інша нафта в якості сировини, та застосовуються інші ніж в Україні технологічні схеми виготовлення, а груповий склад, структурно-реологічний тип та якість імпортованих в Україну дистиляційних дорожніх бітумів значно відрізняється від характерних для вітчизняної дорожньої галузі окислених бітумів [4, 6], можливо припустити, що зміна властивостей цих в'язучих під час введення в них різноманітних добавок буде відбуватися з іншою динамікою. Виходячи з цього питання дослідження особливостей зміни властивостей бітумів, що використовуються в дорожній галузі України, за дії різноманітних модифікаторів, зокрема, адгезійних добавок, є актуальною.

Мета і задача дослідження. Метою роботи є встановлення впливу адгезійної добавки Wetfix BE на властивості нафтових в'язких бітумів, що використовуються у дорожній галузі України. Для досягнення поставленої мети: експериментально визначені стандартні показники якості вітчизняного та імпортованих в Україну нафтових дорожніх бітумів згідно вимог ДСТУ 4044 [7]; виготовлені зразки та визначені показники якості бітумів, модифікованих адгезійною добавкою Wetfix BE; встановлено вплив прийнятої адгезійної добавки на зчеплюваність бітуму з поверхнею скла за допомогою методу ДСТУ 9169 [8]; оцінена зміна властивостей бітумних в'язучих після старіння за методом RTFOT [9].

Методи та об'єкти дослідження. В якості об'єктів дослідження були прийняті вітчизняний (виробництва ПАТ «Укртатнафта») та імпортовані дорожні в'язкі бітуми (виробництва Білорусь (ВАТ «Мозирський НПЗ»), Польща, Греція, Туреччина та Іспанія), що використовувалися у 2021 р. в дорожній галузі України.

Для покращення адгезійних властивостей бітумів було прийнято добавку Wetfix BE, яка є рідкою катіоноактивною адгезійною добавкою на основі амінів. Причиною вибору даної добавки стало те, що вона вже тривалий час широко використовується у вітчизняній дорожній галузі та є однією з найефективніших. Адгезійна добавка в усі прийняті в роботі бітуми вводилась в кількості 0,5%. Приготування модифікованого в'язучого здійснювалось шляхом перемішування бітуму, нагрітого до температури 150 ... 155 °С, з добавкою упродовж 5 ... 10 хв.

Для усіх прийнятих в роботі бітумів визначались стандартні показники якості – пенетрація за 25°C, температура розм'якшеності, зчеплюваність із поверхнею скла. Температура крижкості та дуктильність за 25°C не визначалась, оскільки перший показник є малочутливим як до модифікації бітумів, так і до їх старіння, а другий показник є малоінформативним для дистиляційних бітумів, через занадто високі значення, що перевищують обмеження водяної бані дуктилометру (150 см).

Результати дослідження

Основним призначенням адгезійної добавки Wetfix BE є підвищення зчеплюваності бітуму з поверхнею кам'яних матеріалів, що входять до складу асфальтобетонної суміші. Адгезійна добавка підвищує зчеплюваність бітумів, прийнятих у дослідженні, до поверхні скла, але рівень підвищення для окислених і дистиляційних бітумів є різним (рис. 1).

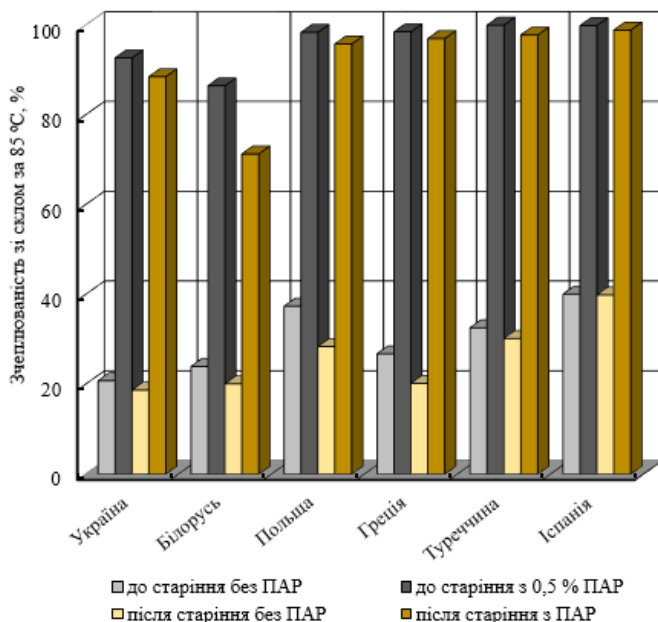


Рис. 1. Вплив добавки Wetfix BE на адгезію бітумів із поверхнею скла

Зчеплюваність всіх прийнятих у роботі дистиляційних бітумів після введення 0,5% Wetfix BE підвищується практично до 100% (98,4 ... 100%, залежно від бітуму) та залишається такою ж високою після старіння за методом RTFOT (95,8 ... 98,9%). Для окислених бітумів зчеплюваність підвищується дещо менше – для бітуму, виготовленого в Білорусі

(виробництва ВАТ «Мозирський НПЗ»), – до 86,5%, а для бітуму, виготовленого в Україні (виробництва ПАТ «Укртатнафта»), – до 92,7%. При цьому після старіння за методом RTFOT зчеплюваність окислених бітумів з добавкою Wetfix BE знижується до 71,3% та 88,5% відповідно.

Згідно з [4], на ефективність дії адгезійної добавки впливає наявність в бітумі великої кількості кисневмісних груп та тип дисперсної структури. При збільшенні в складі бітуму кисневмісних груп, що є характерним для бітумів I структурно-реологічного типу (типу «гель»), для досягнення значної зчеплюваності бітуму необхідно збільшувати кількість катіоноактивної адгезійної добавки за рахунок того, що частина добавки йде на нейтралізацію органічних кислот в'язучого та адсорбцію полярними групами асфальтенів. Для бітумів II структурно-реологічного типу (типу «золь»), в складі яких значно менша кількість асфальтенів, за рахунок меншої адсорбції адгезійної добавки, більша частина добавки витрачається на підвищення зчеплюваності бітуму з поверхнею кам'яних матеріалів [4]. Таким чином, для дистиляційних європейських бітумів доцільно використовувати меншу концентрацію адгезійної добавки, ніж для окислених бітумів (виготовлених в Україні та Білорусі).

Згідно з [4], можливими шляхами взаємодії поверхнево-активних речовин з бітумом є: вплив на дисперсну структуру в'язучого; вплив на структуроутворення у в'язучому під впливом поверхні кам'яних матеріалів; вплив на процеси старіння бітуму.

Введення Wetfix BE у прийнятті в роботі бітуми призводить до різного впливу на їх властивості. Так, стандартні показники якості окислених бітумів, виготовлених в Україні та Білорусі, залишаються без зміни (зміна penetрації та температури розм'якшеності цих в'язучих знаходиться в межах похибки методів визначення цих показників якості). В той же час при введенні адгезійної добавки в дистиляційні бітуми, виготовлені в Польщі, Греції, Туреччині та Іспанії, спостерігається пластифікація в'язучих, яка виражається у підвищенні значень глибини проникності голки за 25°C та зниженні значень температури розм'якшеності, при цьому рівень пластифікації збільшується із зменшенням penetрації вихідного бітуму і наближенням вихідного в'язучого до типу «золь» за структурно-реологічним типом (рис. 2 – 3).

Поясненням цього є особливості впливу адгезійної добавки на дисперсну структуру бітумів різних структурно-реологічних типів. Згідно з [4], у бітумах з відсутнім коагуляційним каркасом з асфальтенів, тобто бітумах, які відносяться до структурно-реологічного типу «золь», введення адгезійної добавки призводить до роз'єднання окремих нечисленних утворень асфальтенів, що є причиною пластифікації в'язучого (збільшення значень penetрації за 25°C та зменшення температури розм'якшеності). В той же час, у прийнятих в роботі окислених бітумах, що за структурно-реологічним типом наближаються до типу «гель»,

прийнята концентрація адгезійної добавки, ймовірно, є замалою для суттєвого впливу на коагуляційний каркас із асфальтенів, тому й не спостерігається зміни стандартних показників якості.

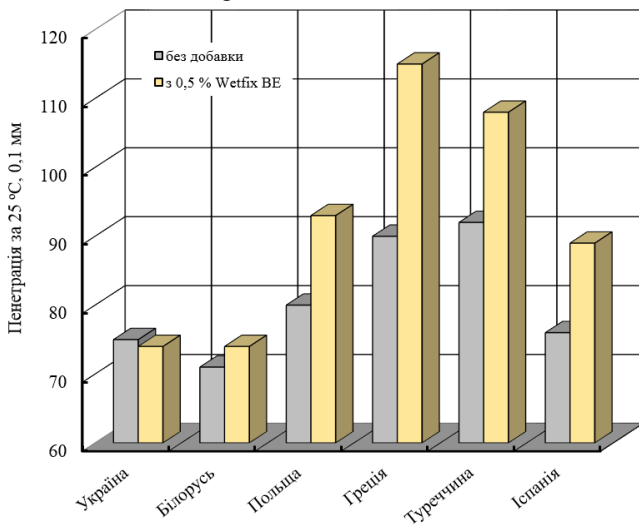


Рис. 2. Вплив добавки Wetfix BE на пенетрацію бітумів

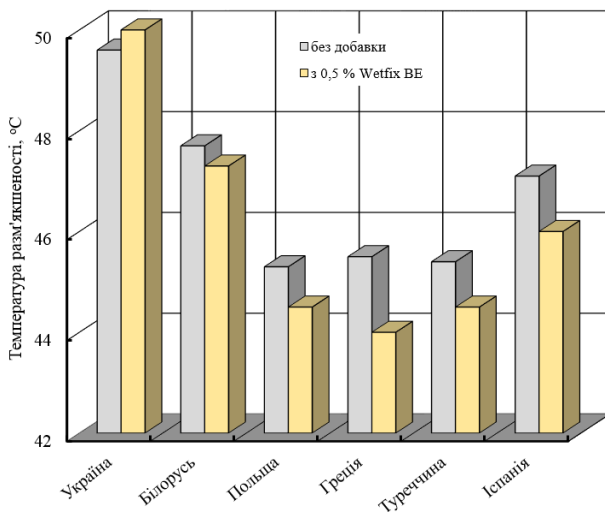


Рис. 3. Вплив добавки Wetfix BE на температуру розм'якшеності бітумів

Крім впливу на дисперсну структуру, адгезійна добавка може впливати й на зміну властивостей бітуму під час старіння. Згідно з [4],

будь-яка добавка, що перешкоджає утворенню просторової структури в бітумі, буде сприяти уповільненню зміни його властивостей під час старіння. Для прийнятих у роботі окислених бітумів, порівняно з дистиляційними європейськими бітумами, є характерними вищі значення залишкової пенетрації після старіння за методом RTFOT (рис. 4).

Так, для окислених бітумів, виготовлених в Україні та Білорусі, значення залишкової пенетрації становлять відповідно 81,3% та 78,9%, а для дистиляційних європейських бітумів найбільше значення залишкової пенетрації становить 78,8% (бітум, виготовлений в Польщі), а найменше значення в 72,2% властиве бітуму, виготовленому в Греції. При цьому введення адгезійної добавки Wetfix VE в окислені бітуми або не впливає, або запобігає старінню, що позначається в тому, що залишкова пенетрація бітуму із ПАР перевищує залишкову пенетрацію бітуму без добавки.

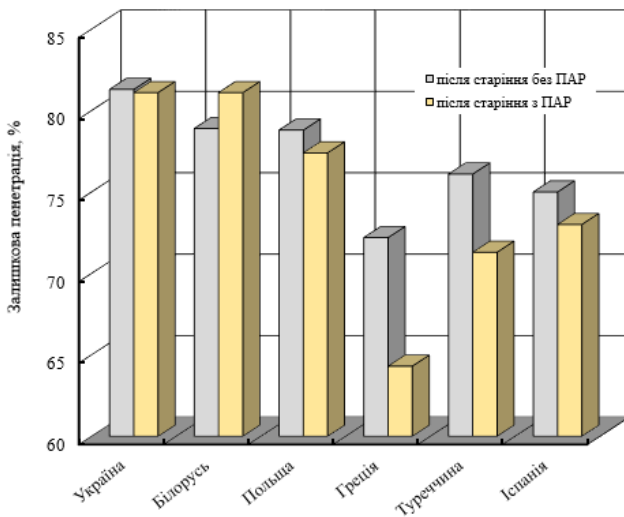


Рис. 4. Вплив добавки Wetfix VE на залишкову пенетрацію бітумів

Введення добавки Wetfix VE в дистиляційні бітуми діє навпаки. Значення залишкової пенетрації у дистиляційних бітумах з адгезійною добавкою є нижчими, ніж у цих же бітумів без добавки (рис. 4). Так, у бітуму, виготовленого в Польщі, введення адгезійної добавки призводить до зменшення значення залишкової пенетрації на 1,4%, у бітуму, виготовленого в Іспанії, – на 2,0%, в Туреччині – на 4,8%, а в Греції – на 7,9%. В той же час, за показником «зміна температури розм'якшеності» після старіння суттєвої різниці між бітумами без добавки та з адгезійною добавкою не спостерігається (найбільша різниця становить 0,7°C, що

знаходиться в межах похибки визначення температури розм'якшеності). Отримане явище може бути зумовлене втратою адгезійною добавкою поміченого пластифікуючого ефекту після прогрівання.

Таким чином, адгезійна добавка Wetfix BE є інгібітором старіння для окислених бітумів, що за своїм структурно-реологічним типом наближається до типу «гель», та, навпаки, навіть дещо прискорює старіння дистиляційних бітумів, що відносяться до типу «золь». Отримані тенденції підтверджуються теоретичними обґрунтуваннями, наведеними в [4], згідно з якими добавки на основі амінів є інгібіторами старіння для бітумів I та III структурно-реологічного типу (тобто, типів «гель» та «золь-гель») за рахунок адсорбції поверхнево-активної речовини на асфальтенах бітуму. Використання ж подібних добавок для бітумів II структурно-реологічного типу «типу «золь» в якості інгібітора старіння є неефективним, оскільки ці адгезійні добавки можуть прискорювати старіння.

Висновки. На основі експериментально отриманих даних можливо зробити наступні висновки:

1. Катіоноактивна добавка Wetfix BE по-різному впливає на окислені та дистиляційні бітуми, що широко використовуються в дорожній галузі України. Ймовірною причиною цього є відмінність хімічного та групового складу та структурно-реологічного типу цих в'язучих.

2. На відміну від окислених бітумів, введення добавки Wetfix BE в дистиляційні бітуми призводить до пластифікації в'язучого в тим більшій мірі, чим ближче бітум за структурно-реологічним типом до типу «золь».

3. Введення добавки Wetfix BE в окислені бітуми сприяє уповільненню зміни їх властивостей після старіння за методом RTFOT, в той час, як використання цієї ж добавки в дистиляційних бітумах збільшує інтенсивність старіння.

4. Для досягнення однакового рівня підвищення зчеплюваності бітумів з поверхнею кам'яних матеріалів, що входять до складу асфальтобетонних сумішей, концентрація добавки Wetfix BE повинна бути дещо більшою в окислених бітумах, що за структурно-реологічним типом наближуються до типу «гель».

5. Перед застосуванням адгезійних добавок на виробництві необхідно враховувати структурно-реологічний тип бітуму, що дозволить оцінити доцільність використання цієї добавки та особливості її впливу на властивості бітуму.

References

1. Airey G.D., Choi Y.K. State of the art report on moisture sensitivity test methods for bituminous pavement materials. *Road Materials and Pavement Design*. 2002. 3(4). P. 355-372.

2. Pyrig Ya.I., Galkin A.V. Metody ocinky adgeziyi ta kogeziyi bitumnyx vyazhuchyx. Kharkov: KhNADU. 224.
3. Lisykhyna A.Y. Poverkhnostno-aktyvnie dobavky dlia povisheniya vodoustoichyvosty dorozhnikh pokrytyi s pryomeneniyem bytumov y dehtei. Moskva: Avtotransyzdat, 1959. 232 s.
4. Kolbanovskaya A. S., Myxajlov V. V. Dorozhnye bitumy. M.: Transport, 1973. 264 s.
5. Ippolitov E.V., Grudnikov I.B. Tehnologiya proizvodstva bitumov. Nedavnyaya istoriya i davnie problemy. Himiya i tehnologiya topliv i masel. 2000. № 4. P.18-24.
6. Galkin A. V., Pirig Ya. I. Oglyad bitumnih v'yazhuchih, scho vikoristovuyutsya v Ukraini. Dorogi i mosti. 2021. Vip. 23. P. 60–75.
7. DSTU 4044:2019. Bitumy naftovi dorozhni v'язki. Texnichni umovy. [Chynnyj vid 2020-05-01]. Vyd. ofic. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy, 2019. 15 p.
8. DSTU 9169:2021 Bitum ta bitumni vyazhuchi. Vyznachennya zcheplyuvanosti z mineralnym materialom [Chynnyj z 2022-08-01]. Vyd. ofic. Kyiv, DP «UkrNDNCz». 2021. 19 p.
9. DSTU B EN 12607-1:2015 (EN 12607-1:2014, IDT). Bitum ta bitumni v'yazhuchi. Vyznachennya oporu do tverdinnya pid vplyvom teploti ta povitrya. Chastina 1. Metod RTFOT. [Chinniy vid 2016-07-01]. Vid. oficz. Kiyiv: MInregion Ukraini. 2016. 23 p.

Список використаної літератури

1. Airey G.D., Choi Y.K. State of the art report on moisture sensitivity test methods for bituminous pavement materials. *Road Materials and Pavement Design*. 2002. Т. 3. №. 4. P. 355-372.
2. Пиріг Я.І., Галкін А.В. Методи оцінки адгезії та когезії бітумних в'язучих. Харків: ХНАДУ, 2019. 224 с.
3. Лысихина А.И. Поверхностно-активные добавки для повышения водостойчивости дорожных покрытий с применением битумов и дегтей. Москва: Автотрансиздат, 1959. 232 с.
4. Колбановская А.С., Михайлов В.В. Дорожные битумы. М.: Транспорт, 1973. 264 с.
5. Ипполитов Е.В., Грудников И.Б. Технология производства битумов. Недавняя история и давние проблемы. *Химия и технология топлив и масел*. 2000. № 4. С.18-24.
6. Галкін А. В., Пиріг Я. І. Огляд бітумних в'язучих, що використовуються в Україні. *Дороги і мости*. 2021. Вип. 23. С. 60–75.
7. ДСТУ 4044:2019. Бітуми нафтові дорожні в'язкі. Технічні умови. [Чинний від 2020-05-01]. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України, 2019. 15 с.
8. ДСТУ 9169:2021 Бітум та бітумні в'язучі. Визначення зчеплюваності з мінеральним матеріалом [Чинний з 2022-08-01]. Вид. офіц. Київ, ДП «УкрНДНЦ». 2021. 19 с.
9. ДСТУ Б EN 12607-1:2015 (EN 12607-1:2014, IDT). Бітум та бітумні в'язучі. Визначення опору до твердіння під впливом теплоти та повітря. Частина 1. Метод RTFOT. [Чинний з 2016-07-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України. 2016. 23 с.

**ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ НОРМ ВІТРОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА
БУДІВЕЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ**

**TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF WIND LOAD CODES
FOR BUILDING STRUCTURES**

**Пічугін С.Ф., д.т.н., проф. (Національний університет
«Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», м. Полтава)**

**Pichugin S.F., Dr. Tech. Sc., Professor (National University «Yuri
Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava)**

Стаття містить систематизований огляд науково-технічних публікацій з проблем вітрового навантаження за 90-річний період – з 30-х років ХХ століття до теперішнього часу. Наголошується, що це навантаження на споруди має складну фізичну природу та мінливий характер. Головна увага приділяється аналізу еволюції норм проектування конструкцій у частині змін територіального районування та розрахункових коефіцієнтів, призначення нормативних та розрахункових значень вітрового навантаження. Зазначається, що більшість параметрів норм вітрового навантаження має ймовірнісну природу та вимагає для свого обґрунтування застосування статистичних методів. Виділяються наукові результати, які можуть бути включеними до наступних видань норм вітрового навантаження.

Ensuring the reliability and safety of buildings and structures depends to a large extent on the correct understanding of the nature, quantitative description and normalization of loads on building structures, including wind loads. These loads have a rather complex physical nature and changeable nature, which require knowledge of thermodynamic processes in the atmosphere, physical properties of wind effects, methods of meteorological observations and climatological description of the area, variability of wind loads, nature of wind blowing of structures and buildings. Such features are to a certain extent reflected in the sections of the codes for the design of building structures containing wind load codes. Most of the parameters of the wind load codes are probabilistic in nature and require the application of statistical methods for their justification. These methods were constantly changing and developing along with the regular revision of building design codes. Therefore, the analysis of the evolution of domestic wind load codes together with their statistical substantiation is an urgent task. Materials devoted to wind loads have been published in various scientific and technical journals, collections of articles, and conference materials. The article contains a systematic review of design codes and publications on the problem of wind load over a 90-year period from the 1930s to the present. The main attention is paid to the analysis of trends in the development of codes for the design of structures in terms of changes in calculation coefficients, the assignment of normative and calculation values of wind load and the involvement of experimental statistical data. The high scientific level of domestic

codes DBN B.1.2-2006 "Loads and loadings", which have a modern probabilistic basis and are associated with Eurocode codes, is noted. Scientific results are highlighted that can be included in the following wind load codes.

Ключові слова: вітрові спостереження, вітрове навантаження, територіальне районування, нормативне навантаження, розрахункове навантаження

Key words: wind observations, wind load, territorial zoning, normative load, design load.

Вступ. Забезпечення надійності та безаварійності будівель і споруд великою мірою залежить від правильного розуміння природи та кількісного опису, нормування навантажень на будівельні конструкції, у тому числі вітрових навантажень. Ці навантаження на споруди мають складну фізичну природу та мінливий характер, вони вимагають знань термодинамічних процесів в атмосфері, фізичних властивостей вітрових впливів, методики метеорологічних спостережень і кліматологічного опису місцевості, мінливості вітрових навантажень, характеру обдування вітром конструкцій і споруд. Вказані особливості певною мірою відбиваються у розділах норм проектування будівельних конструкцій, що містять нормативи вітрового навантаження. Більшість параметрів норм вітрового навантаження мають ймовірнісну природу і вимагають для свого обґрунтування застосування статистичних методів. Ці методи постійно змінювалися та розвивалися разом з регулярним переглядом норм будівельного проектування. Аналіз еволюції вітчизняних норм вітрового навантаження разом з їх статистичним обґрунтуванням є актуальним завданням.

Аналіз результатів досліджень і публікацій. Регулярні вітрові спостереження проводяться з кінця XIX століття. У 30-ті роки їх результати послужили основою складання першого нормативного документа з вітрового навантаження та перших публікацій з цієї проблеми [1,2]. Цей процес активізувався підготовкою до переходу розрахунків конструкцій на методику граничних станів [3]. У наступні роки разом із регулярним переглядом норм навантажень і впливів на конструкції удосконалювалося нормування вітрового навантаження. Еволюція вітрових норм висвітлювалася в публікаціях провідних науково-технічних журналів, в оглядах розвитку вітрових норм, опублікованих як розділи монографій та дисертацій, присвячених навантаженням на будівлі та споруди [4 – 13]. Починаючи з 90-х років минулого століття, норми проектування розроблялися окремими державами, які раніше входили до СРСР. У зв'язку з цим активізувалися ймовірнісні дослідження вітрового навантаження на території України [14 – 26], результатом яких став відповідний розділ ДБН В.1.2-2006 «Навантаження та впливи». У наступні роки дослідження вітрового навантаження продовжилися разом із

обґрунтуванням та уточненням низки розрахункових коефіцієнтів [27 – 30].

Мета і задачі дослідження. Матеріали, присвячені вітровому навантаженню, опубліковані у різних науково-технічних журналах, збірниках статей, матеріалах конференцій. Доступ до цих видань утруднений, опубліковані огляди розвитку нормування вітрового навантаження неповні та не включають результати досліджень останніх 15 – 20 років. Стаття містить систематизований огляд публікацій у провідних науково-технічних виданнях щодо проблеми вітрового навантаження за 90-річний період – з 30-х років ХХ століття до теперішнього часу. Головна увага приділяється аналізу еволюції норм проектування конструкцій у частині змін територіального районування та розрахункових коефіцієнтів, призначення нормативних і розрахункових значень вітрового навантаження та залучення до цього досвідчених статистичних даних. Виділяються наукові результати, які можуть бути включеними до наступних видань норм вітрового навантаження.

Основний матеріал та результати. Збір інформації про вітрові впливи виконувався на території дореволюційної Росії із середини ХІХ століття у складі загальних кліматологічних робіт. Ця робота активізувалася, коли в 1849 р була створена перша у світі Головна фізична обсерваторія (згодом Головна геофізична обсерваторія ім. А.І. Воєйкова), яка організувала мережу метеорологічних станцій по всій країні та обробляла їхні спостереження. Поряд з іншими спостереженнями, метеостанції виконували регулярні виміри швидкості та напрямку вітру.

Початок вітчизняного нормування вітрових навантажень було покладено в 1930 р, коли були введені в дію перші норми в галузі будівництва – «Єдині норми будівельного проектування». Певна наукова основа для обґрунтування норм у той період вже була: багаторічні метеорологічні вітрові спостереження (3 рази на добу); аеродинамічні дослідження, що проводилися ще з дореволюційного часу в лабораторіях та інститутах.

В Єдиних нормах вітрове навантаження визначалося за формулою, що мала досить незвичайний вигляд із сучасної точки зору:

$$p_e = k(p_e^0 + k_1 h), \quad (1)$$

де p_e – тиск вітру в кг/м^2 , нормальний до поверхні, що його сприймає; цей тиск вважається позитивним, коли він спрямований всередину споруди, та негативним, коли він спрямований назовні; k – коефіцієнт обтікання, що залежить від форми і положення схильного до вітру об'єкта; p_e^0 – найбільший тиск у кг/м^2 при прямуванні повітряного

потоків нормально до поверхні. Цей тиск становить за величиною напір вітру, що відповідає найбільшій для даного місця швидкості вітру (без урахування особливих його поривів), і може бути визначений за формулою:

$$p_e^o = \frac{\gamma}{g} \cdot \frac{v^2}{2} = \frac{v^2}{16}, \quad (2)$$

де $\gamma = 1,23 \text{ кг/м}^3$ - вага повітря (тиск 760 мм, температура 15°C); $g = 9,81 \text{ м/сек}^2$ - прискорення сили тяжіння; v - розрахункова швидкість вітру в м/сек.

Якщо величина v не була встановлена результатами метеорологічних спостережень, що систематично проводилися в районі будівництва протягом не менше 20 років, тиск p_e^0 приймався постійним, рівним для трьох географічних районів СРСР:

- 1 район – прибережна смуга Чорного моря завдовжки 100 км із центром у м. Новоросійську – 100 кг/м^2 ;
- 2 район – узбережжя морів (за винятком Азовського моря та Фінської затоки) і пониззі великих річок, що впадають у них, – 75 кг/м^2 ;
- 3 район – вся територія СРСР, за винятком 1 та 2 районів – 50 кг/м^2 .

Це районування було встановлено на підставі вимірів швидкості вітру флюгером Вільда з двохвилинним осередненням. Наведені районні значення відповідали відкритій місцевості; в місцях, закритих від вітру забудовою або рідкісною рослинністю, наприклад, у селищах або на околицях міст, значення зменшувалися на 20% (відповідні районні значення 80, 60 та 40 кг/м^2); у місцях великої забудови або густої рослинності – вводилося зменшення на 40% (районні значення 60, 45 та 30 кг/м^2).

Параметр h у формулі (1) – повна висота споруди (в метрах) над обрізом фундаменту; k_1 – розрахунковий коефіцієнт, що приймався в залежності від характеру обтікання споруд вітром.

Величина $(p_e^0 + k_1 h)$ у всякому разі не повинна була перевищувати 150 кг/м^2 .

Єдині норми визначали, що величину коефіцієнта обтікання слід приймати, виходячи зі спеціальних дослідів чи досліджень. У разі відсутності дослідних даних цей коефіцієнт допускалося приймати за табличними даними, наведеними в нормах. Для основного варіанта – вертикальних стін – наводився коефіцієнт $k = +0,8$ для активного тиску та $k = -0,4$ для відсмоктування (згодом це значення було підвищено). Були

наведені також дані: для будівель з двосхилими дахами; двосхилих та циліндричних покриттів без стін; веж і труб прямокутного та круглого перерізів; ґратчастих та суцільних ферм мостів.

Нормування вітрового навантаження було розвинуте у нормах ОСТ/ВКС 7626/а, запроваджених у 1933 р. [1]. У них вітрове навантаження визначалося за іншою формулою:

$$P_a = k \cdot q, \quad (3)$$

де k – коефіцієнт обтікання; q – вітровий тиск, що визначався аналогічно p_g^0 у формулі (1).

Вітровий поділ території СРСР зберігався на зазначені вище три географічні райони, причому для 1 району було залишено значення 100 кг/м^2 , для 2 і 3 районів тиск було знижено до 70 кг/м^2 і 45 кг/м^2 .

Для споруд висотою до $h_0 = 20$ м вітрове навантаження приймалося постійним, рівномірно розподіленим за висотою. При зміні висоти h над рівнем земної поверхні вітровий тиск визначався за формулою

$$q : q_0 = \sqrt{h} : \sqrt{h_0}. \quad (4)$$

Степенева залежність (4) була доповнена кривими швидкісного тиску для трьох географічних районів.

Вітрові норми 1933 р. включали розгорнуту інформацію по коефіцієнту обтікання k у вигляді таблиці з 16 варіантами поверхонь і вантажних площ. Були наведені дані: для будівель зі скатними, циліндричними та шедовими дахами; будівель із підвищеною середньою частиною (ліхтарем), циліндричних покриттів без стін; частково відкритих будівель та навісів; веж та труб; ґратчастих конструкцій.

Оцінюючи описані вище вітрові норми, слід зазначити, що перше вітрове районування було недостатньо диференційованим і регламентувало для всієї території СРСР (за невеликими винятками) лише одне базове значення вітрового напору $q = 45 \text{ кг/м}^2$. Воно не було достатньо статистично обґрунтовано. Як показали наступні дослідження, це значення виявилось заниженим і згодом було збільшене. Можливо, автори норм враховували це, тому рекомендували проектувальникам використовувати додатково відому шкалу сили вітру Бофорта, доповнену значеннями вітрового тиску [1]. Згідно з цією шкалою, нормоване значення $q = 45 \text{ кг/м}^2$ відповідає 8 балам та «дуже міцному вітру» зі швидкістю 18 – 20 м/с. У той же час, судячи зі шкали Бофорта, під час

штормів та ураганів (9 – 12 бали) швидкість вітру та відповідний вітровий тиск можуть бути значно вищими. Слід зазначити, що у перших нормах вже враховувалося зростання вітрового навантаження з висотою, вплив захищеності споруд та характер обтікання будівель різної конфігурації.

У 1930-ті роки проводилася низка досліджень вітрових впливів. Починаючи з 1936 р., метеорологічні спостереження за вітром та іншими кліматичними параметрами стали проводитися 4 рази на добу, що розширило статистичний базис вітрового нормування. У 1931-37 рр. будівельну аеродинаміку вивчали в лабораторії ЦНПС (Центрального науково-дослідного інституту промислових споруд) під керівництвом Е.І. Ретера. Тут шляхом продування моделей в аеродинамічній трубі було вивчено характер впливу вітру на однопролітні та багатопролітні будівлі з ліхтарями [2]. Ряд експериментальних даних, які становлять інтерес для будівельників, було отримано в ЦАГІ. У 1940 р був прийнятий загальносоюзний стандарт ОСТ 90059-40 «Вітрові навантаження». У ньому вітрове навантаження визначалося за аналогічною формулою зі зміненими позначеннями

$$q_6 = kq_0, \quad (4)$$

де q_0 – швидкісний напір вітру; k – аеродинамічний коефіцієнт.

Вітрове районування отримало невеликі зміни за формою і включало для кожного району значення швидкісного тиску на висоті до 20 м і 100 м і більше. Для основної території СРСР швидкісний тиск вітру був зменшений з 45 кг/м^2 до 40 кг/м^2 . Основні аеродинамічні коефіцієнти були представлені для вертикальних поверхонь (+0,8 та -0,6) та у вигляді схеми для циліндричних поверхонь. Формула (2) для визначення швидкісного тиску адресувалася місцевостям з різко вираженим рельєфом.

У зв'язку з переходом у 50-х роках минулого століття на розрахунок за граничними станами гостро відчулася необхідність розвитку норм навантажень. З урахуванням нових даних, у 1954 р. було введено Будівельні норми та правила СНиП II-Б.1-54 «Основні положення з розрахунку будівельних конструкцій». Ці норми відповідали запровадженню розрахунку конструкцій методом граничних станів. При переході на цей метод як нормативне навантаження були прийняті значення розрахункового вітрового навантаження за попередніми нормами q_6 . До них були додані значення швидкісного тиску вітру на висоті до 10 м (районні значення 30, 55 і 100 кг/м^2). Крім того, з'явився IV район – берегова смуга Північного Льодовитого та Тихого океанів, – для якої вітрове навантаження регламентувалося особливими нормами. Розрахункові вітрові навантаження, які почали трактуватися як найбільш

можливі під час експлуатації конструкції, стали визначатися шляхом множення на коефіцієнт перевантаження. Цей коефіцієнт у зв'язку з відсутністю достовірних даних щодо мінливості вітрових максимумів було прийнято загальним для всієї території $n = 1,2$. Аеродинамічні коефіцієнти основних поверхонь були представлені в лаконічній табличній формі. Окремі схеми ілюстрували аеродинамічні коефіцієнти для будівель зі скатним та циліндричним дахом, а також з ліхтарями.

В цей же час Головна геофізична лабораторія провела статистичну обробку даних за швидкостями вітру за 20 років, яка показала, що розрахункове вітрове навантаження для першого району, що охоплює практично всю територію СРСР, має забезпеченість 3%, тобто можливе в середньому один раз за 30 – 50 років [3]. Разом з тим було обгрунтовано необхідність виділити ряд областей із підвищеними нормативними швидкостями вітру: південні степові райони Європейської частини СРСР, деякі райони Казахстану та Сибіру, що було враховано під час уточнення географічного вітрового районування СРСР при розробці наступних видань СНиП.

У 1958-1960 рр. на у ГГО ім. А.І. Воєйкова було виконано обробку щоденних 4-х термінових швидкостей вітру (без урахування напряму при 2-х хвилинному осередненні) за багаторічний період із застосуванням статистичної екстраполяції в область значень швидкостей понад 20 м/с [4]. Були використані дані про швидкості вітру приблизно в 1200 пунктах Радянського Союзу з повторюваністю один раз за 20, 15, 10, 5 років та 1 рік. Як апроксимаційна функція використовувався видозмінений вираз розподілу Вейбулла, запропонований Л.С. Гандінім

$$F(v) = P(V \geq v) = \exp[-(v/\beta)]^\gamma, \quad (5)$$

де $F(v)$ – ймовірність (або повторюваність) того, що швидкість вітру V досягне або перевершить величину v ; β та γ – параметри, що залежать від вітрового режиму району; β знаходиться поблизу середнього значення; γ характеризує відносне розсіювання членів ряду.

До даних для швидкостей вітру понад 20 м/с, отриманих за допомогою флюгерів із важкою дошкою, на пропозицію В.О. Отставнова вводилася понижувальна поправка (до 10% для $v = 40$ м/с), яка враховує систематичне завищення швидкостей вітру спостерігачами [5].

За заданою ЦНДІБК градацією швидкісних тисків та повторюваності швидкостей вітру один раз за 5 років було виконано районування території колишнього СРСР за семи нормативними значеннями швидкісних тисків вітру [6]. Нову карту більш детального районування за вітровим навантаженням було вперше включено до СНиП II-A.11-62

«Навантаження та впливи». Районні нормативні швидкісні тиски вітру для висоти над поверхнею землі 10 м (стандартної висоти установки флюгера чи анемометра) перебували у діапазоні 27 – 100 кг/м². Гірські райони, що заштриховані на карті, були виділені в особливий район. Вітрове навантаження суттєво зросло для колишнього Казахстану, півдня Західного Сибіру, узбереж Далекého Сходу та деяких інших районів, а в деяких районах було збережено на колишньому рівні або дещо знижено (у центральних районах, віддалених від узбереж). Для будівель, розташованих серед суцільної забудови, у СНиП П-А.11-62 дозволялося знижувати швидкісний натиск вітру на 30% – таким чином, приблизно враховувалася шорсткість місцевості. Врахування зростання вітрового навантаження з висотою було розвинено порівняно з попередніми нормами і представлено у вигляді таблиці, в якій для висот в діапазоні 10...350 м вказувалися поправочні коефіцієнти 1,0...3,0. Коефіцієнт перевантаження був залишений тим самим $n = 1,2$ для звичайних будівель та споруд, що забезпечувало період повторення розрахункового навантаження $T = 10...15$ років; для високих споруд, при розрахунку яких вітрове навантаження має вирішальне значення (башт, щогл, градирень та ін.), приймався $n = 1,3$, що відповідає $T = 20$ років. При перевірці міцності конструкцій для умов монтажу коефіцієнт перевантаження до вітрового навантаження не вводився.

Крім того, ЦНДІБК (Л.В. Клепиков) ретельно проаналізував результати вітчизняних та зарубіжних досліджень у галузі аеродинамічних коефіцієнтів і дав у СНиП принципово нову таблицю їх значень для 17 поперечних перерізів будівель та елементів. Було внесено суттєві доповнення для навісів, наскрізних конструкцій, циліндричних споруд. Ця таблиця переважно збереглася до норм 1985 р., тобто використовувалася понад 20 років. Для високих споруд у СНиП був вперше введений підвищуючий коефіцієнт β , що враховує динамічний вплив пульсацій швидкісного тиску, викликаних поривами вітру, і дана методика його визначення.

Під час підготовки кліматичних параметрів вітрових навантажень для наступного видання СНиП Л.В. Клепиков проаналізував великий матеріал 4-х термінових спостережень за флюгером [7]. Він виявив, що для статистичного згладжування екстраполяції місячних та річних максимумів модуля швидкості вітру підходить подвійний експоненційний розподіл Гумбеля (розподіл екстремумів I типу):

$$F(v) = \exp \left[- \exp \left(- \frac{v - \alpha}{\beta} \right) \right], \quad (6)$$

де α – параметр положення; β – масштабний параметр.

Використання цього розподілу дозволило зробити висновок, що можна очікувати в середньому зниження швидкісного тиску приблизно на 10% без зміни періоду повторюваності, встановленого в нормах, що діють. Отримані результати підтверджено розробками кліматологів ГГО ім. А.І. Воейкова [8], зарубіжними результатами [9] і завершилися розробкою нового районування території СРСР за швидкісним тиском вітру (у колишній градації їх нормативних значень), яке увійшло у наступне видання норм вітрових навантажень.

Важливий аспект вітрового впливу на споруди – залежність швидкісного тиску від висоти – був у сфері уваги кліматологів і розробників норм. Вихідні статистичні дані для оцінки цієї залежності були отримані на 160 аерологічних станціях, які вимірюють швидкості вітру на різних висотах за допомогою радіозондів та радіолокаційних станцій типу «Метеор» та «Метеорит». Спостереження за вітром регулярно проводилися також на таких висотних спорудах, як метеорологічна щогла в Обнінську (висота 300 м), Московській телевежі заввишки 503 м та інших об'єктах. В результаті були побудовані вертикальні профілі швидкості вітру [10], описані степеневим законом виду

$$v(z) = v_{10} (z/10)^\alpha, \quad (7)$$

де z – висота над поверхнею землі; α – показник степені, що залежить від шорсткості місцевості.

Для з'ясування впливу шорсткості підстиляючої поверхні на профіль вітру використовувалися дані вимірювань на щоглах у Києві, Новосибірську, Ленінграді та Обнінську. В результаті було виділено три типи місцевості залежно від степені її захищеності.

До чергового видання норм СНиП II-6-74 «Навантаження та впливи» було включено накопичені напрацювання в галузі вітрового навантаження, описані вище. Було чітко сформульовано, що вітрове навантаження – це сума статичної та динамічної складових. Статична складова, що відповідає швидкісному тиску, що встановився, повинна враховуватися у всіх випадках. Динамічна складова, викликана пульсаціями швидкісного тиску, повинна враховуватися переважно для високих споруд.

Визначення нормативного значення статичної складової вітрового навантаження відрізнялося від попередніх норм:

$$q_c^H = q_0 k c, \quad (8)$$

де q_0 – швидкісний тиск, що приймається за колишніми районними значеннями та дещо зміненою картою районування території СРСР; k – новий коефіцієнт, що враховує зміну швидкісного натиску за висотою та типом місцевості; c – аеродинамічний коефіцієнт.

Для обґрунтування коефіцієнта k були прийняті до уваги результати проведених вітчизняних вітрових спостережень на висотних спорудах та зарубіжні дані, і було прийнято степеневий закон зміни швидкісних напорів за висотою (7). Було введено в облік цього коефіцієнта також два типи місцевості, що відрізнялися ступенем захищеності: тип А – відкриті; тип Б – місцевості з перешкодами (міста, лісові масиви та ін.). Коефіцієнти k перебували для висот 10...350 м у діапазоні 1,0...3,1 для місцевостей типу А й у діапазоні 0,65...3,1 для місцевостей типу Б, причому всі коефіцієнти виявилися нижчими відповідних значенб з попередніх норм. Був суттєво розвинений облік динамічної складової вітрового навантаження, розроблений М.Ф. Барштейном [11] з урахуванням фундаментальних робіт А.Г. Давенпорта [12].

У наступному виданні СНиП 2-01-07-85 «Навантаження та впливи», що вийшов через 11 років, вітрове навантаження розширено трактувалося як сукупність нормального тиску, прикладеного до зовнішньої та внутрішньої поверхонь будівель, та сил тертя, спрямованих по дотичній до зовнішньої поверхні, або як нормальне тиск на споруду. Згідно з рекомендаціями вказаних норм, вітрове навантаження, як і раніше, слід було визначати як суму середньої та пульсаційної складових. Пульсаційну складову вітрового навантаження допускалося не враховувати при розрахунку багатоповерхових будівель заввишки до 40 м і одноповерхових виробничих будівель заввишки до 36 м при відношенні висоти до прольоту менше 1,5, що розміщуються в місцевостях типів А і В (див. нижче).

Нормативне значення середньої складової вітрового навантаження, позначене w_m , на висоті z над поверхнею землі визначалося за модифікованою формулою

$$w_m = w_0 k c, \quad (9)$$

де w_0 – нормативне значення вітрового тиску; k – коефіцієнт, що враховує зміну вітрового тиску по висоті; c – аеродинамічний коефіцієнт.

При цьому нормативне значення вітрового тиску w_0 (Па) визначалося за формулою (2), в якій v_0 – швидкість вітру (м/с), на рівні 10 м над поверхнею землі для місцевості типу А, що відповідає

10-хвилинному інтервалу осереднення і перевищується в середньому один раз за 5 років. Перехід до нового інтервалу осереднення замість бувшого двохвилинного інтервалу відповідає рішенням Всесвітньої метеорологічної організації. Він призвів до зменшення нормативного вітрового тиску, яке приблизно враховується множенням на коефіцієнт 0,92 [13]. Тому скореговані районні значення вітрового тиску перейшли у діапазон 0,23...0,85 кПа (кгс/м²) замість 0,27...1,00 кПа за попередніми нормами. При цьому попередні розрахункові значення навантажень були збережені, коефіцієнт, який раніше називався «коефіцієнтом перевантаження», одержав нову назву «коефіцієнт надійності за вітровим навантаженням», нове позначення і був підвищений до $\gamma_f = 1,4$.

Перелік типів місцевості, які враховуються при визначенні коефіцієнта k , був доповнений типом С для міських районів із забудовою будинками висотою більше 25 м. Значення коефіцієнта k були вміщені у диференційовану таблицю зі значеннями в діапазоні 0,4...2,75 для висот 5...480 м, вони були дещо зменшені на основі нових метеорологічних даних, наведених у науковій і нормативній літературі різних країн. В таблиці аеродинамічних коефіцієнтів були внесені зміни, які відносились до циліндричних і призматичних споруд та будівель із zenітними та поздовжніми ліхтарями [13].

З розпадом СРСР перед новими державами відкрилася можливість відійти від огрубленого радянського вітрового нормування та розробити власне, більш диференційоване вітрове районування. Подальший розвиток вітрових норм на території СНД реалізувався у вигляді національних норм окремих держав. Українські фахівці підготували Державні норми України ДБН В.1.2–2006 «Навантаження та впливи», які концептуально відрізняються від СНиП у частині вітрових навантажень. Було суттєво розвинено ймовірнісне представлення випадкових навантажень на будівельні конструкції, зокрема вітрових навантажень. Розроблено такі математичні моделі, як випадкові процеси, абсолютні максимуми випадкових процесів, схема незалежних випробувань, дискретне представлення, екстремуми, корельована випадкова послідовність перевантажень [14]. Це дозволило обґрунтувати для середньої складової вітрового навантаження ймовірнісну модель у вигляді диференційованого випадкового процесу [15,16]. Розподіл Вейбулла, який добре описує дослідні дані, було використано для ймовірнісного опису вітрового навантаження. Цей розподіл має наступні диференційну і інтегральну функції розподілу:

$$f(\gamma) = \frac{\beta}{\alpha} (X - \gamma)^{\beta-1} \exp\left[-\frac{(X - \gamma)^\beta}{\alpha}\right]; \quad F(X) = 1 - \exp\left[-\frac{(X - \gamma)^\beta}{\alpha}\right], \quad (14)$$

де γ – параметр положення розподілу, якщо $\gamma = 0$, тоді розподіл можливий тільки при $X \geq 0$; $\alpha > 0$ – параметр масштабу, що визначає витягнутість розподілу; $\beta > 0$ – параметр форми, від якого залежить вигляд розподілу; при $\beta = 1$ розподіл Вейбулла перетворюється в експоненційний розподіл, при $\beta = 2$ – в розподіл Релея.

Аналіз стохастичної природи вітрового навантаження дозволив представити його у вигляді квазістаціонарного випадкового процесу з відносно повільно мінливими протягом річного циклу числовими характеристиками й розподілом ординати, з постійною частотною структурою. Сезонні зміни математичного очікування вітрового навантаження протягом року описуються алгебраїчним поліномом 3-го ступеня, середньорайонні коефіцієнти варіації й асиметрії – виявилися постійними для території України. Річний тренд математичного очікування \bar{X} й стандарту \hat{X} середньорайонних вітрових навантажень ілюструється порівняно невисокими плавними кривими з вершиною, що приходиться на зимові місяці. На основі викладених положень з використанням узагальнених дослідних даних 77 метеостанцій України і додатково 10 метеостанцій інших країн СНД були обґрунтовані розрахункові параметри імовірнісної моделі вітрового навантаження [17 – 19].

Розробці і виходу у світ Державних норм України ДБН В.1.2-2006 "Навантаження і впливи" у частині вітрового навантаження передували багаторічні роботи закордонних та українських дослідників [20 – 23]. Для статистичного дослідження і нормування вітрового навантаження були використані результати строкових вимірювань швидкості і напрямку вітру, виконаних анеморумбометрами на 195 метеостанціях України упродовж 1970...1990 років. В цілому для нормування вітрового навантаження України була використана представницька вибірка з більше 12 мільйонів результатів строкових спостережень за вітром.

Вимоги ДБН щодо вітрового навантаження поширюються на будівлі і споруди простої геометричної форми, висота яких не перевищує 200 метрів. Згідно з ДБН вітрове навантаження є змінним навантаженням, для якого встановлені два розрахункові значення: граничне і експлуатаційне розрахункові значення. Граничне розрахункове значення вітрового навантаження визначається за формулою

$$W_m = \gamma_{fm} W_0 C, \quad (15)$$

де γ_{fm} – коефіцієнт надійності за граничним розрахунковим значенням вітрового навантаження; W_0 – характеристичне значення вітрового тиску (в Па); C – коефіцієнт, що визначається за формулою (16).

Характеристичне значення вітрового тиску W_0 дорівнює середній (статичній) складовій тиску вітру на висоті 10 м над поверхнею землі, який може бути перевищений, на відміну від СНиП, у середньому один раз за 50 років (аналогічно нормам Єврокод). Характеристичне значення вітрового тиску W_0 визначається залежно від вітрового району по карті або табличному додатку. Відмітимо, що вітрове районування території України згідно з ДБН враховує значну територіальну мінливість вітрового навантаження, що помітно відрізняється від його занадто узагальненого нормування за СНиП, згідно з якими практично уся територія України відносилася до II-го (нормативне навантаження $W_0 = 0,3$ кПа, розрахункове 0,42 кПа) і III-го ($W_0 = 0,38$ кПа, розрахункове 0,53 кПа) вітрових районів. Більш детальне територіальне районування України за характеристичними значеннями вітрового навантаження включає п'ять територіальних районів з розрахунковими характеристичними значеннями від 0,4 до 0,6 кПа. Найменші значення вітрового навантаження спостерігаються в центральних і північно-західних районах України, а також в Закарпатті. Великі вітрові навантаження реалізуються в Карпатах, Прикарпатті і в приморських районах. Територіальне районування України за характеристичними значеннями вітрового тиску було виконано за методикою, розробленою В.А. Пашинським [22]. Використовувалася ймовірна модель нестационарного нормального випадкового поля, ординатами якого були значення навантажень окремих метеостанцій, розташованих на відстанях 30...60 км. Процедура згладжування дозволила отримати плавну поверхню математичного очікування вітрового навантаження, вільну від випадкових флуктуацій даних окремих метеостанцій. Районні значення розрахункового вітрового навантаження встановлювалися так, щоб надмірні запаси територіального районування були мінімальними.

Порівняння вітрового районування за ДБН зі СНиП виявляє порівняно невелику різницю розрахункових швидкісних тисків. Для центральних областей, Криму, Львова, Одеси, Херсона і Луганська вітрове навантаження менше, ніж в нормах СНиП. У Приазов'ї, навпаки, вітрове навантаження набагато вище. В середньому по Україні районування за ДБН занижує вітрове навантаження на 4%. При цьому для 34 % пунктів спостереження вітрове навантаження занижене на 15...25%, а для 12% пунктів – підвищене на 25...65%.

Коефіцієнт C визначається за розгорнутою формулою, аналогічною формулі норм Єврокод

$$C = C_{aer} C_h C_{alt} C_{rel} C_{dir} C_d, \quad (16)$$

де C_{aer} – аеродинамічний коефіцієнт; C_h – коефіцієнт висоти споруди; C_{alt} – коефіцієнт географічної висоти; C_{rel} – коефіцієнт рельєфу; C_{dir} – коефіцієнт напрямку; C_d – коефіцієнт динамічності.

Аеродинамічні коефіцієнти C_{aer} , що враховують характер обдування споруд вітром і визначаються залежно від форми споруди або конструктивного елемента, залишилися в ДБН без суттєвих змін.

Коефіцієнт висоти споруди C_h враховує збільшення вітрового навантаження з висотою. На відміну від СНіП, в якому використовувалася степенева залежність швидкості вітру від висоти (7), у ДБН впроваджена логарифмічна залежність, як в європейських нормах

$$\bar{v}(z) = \bar{v}_{10} \frac{\ln(z/z_0)}{\ln(10/z_0)}, \quad (16)$$

де $\bar{v}(z)$ і $\bar{v}(10)$ – середні швидкості вітру на висоті z і 10 м відповідно; z_0 – параметр шорсткості підстилаючої поверхні, який визначається у залежності від типу навколишньої місцевості; на відміну від трьох типів за СНіП, ДБН включає чотири типи місцевості: I – відкриті поверхні морів, озер, плоскі рівнини; II – сільська місцевість; III – приміські і промислові зони, протяжні лісові масиви; IV – міські території, на яких принаймні 15% поверхні зайняті будівлями, що мають середню висоту понад 15 м.

Коефіцієнт географічної висоти C_{alt} враховує висоту розміщення будівельного об'єкта над рівнем моря; коефіцієнт рельєфу C_{rel} враховує мікрорельєф місцевості поблизу площадки розташування будівельного об'єкта; коефіцієнт напрямку C_{dir} враховує нерівномірність вітрового навантаження за напрямками вітру.

Коефіцієнт динамічності C_d враховує вплив пульсаційної складової вітрового навантаження і просторову кореляцію вітрового тиску на споруду. Для будівель і споруд, старший період коливань яких не перевищує 0,25 сек, $C_d = 1$. Для основних типів будівель і споруд, старший період коливань яких перевищує 0,25 сек, значення C_d визначаються за графіками, наведеними в ДБН.

Коефіцієнт надійності γ_{fm} за граничним розрахунковим значенням вітрового навантаження визначається у табличній формі залежно від заданого середнього періоду повторюваності T в діапазоні 0,55...1,45 для $T = 5...500$ років. Для об'єктів масового будівництва допускається середній період повторюваності T приймати таким, що дорівнює встановленому терміну експлуатації конструкції T_{ef} . Для переходу від базового періоду повторюваності $T = 50$ років до інших значень T (в роках) обгрунтована

залежність, узагальнена для території України, для коефіцієнта надійності по граничному розрахунковому значенню вітрового навантаження [22]:

$$\gamma_{fm} = 0,56 + 0,12 \ln T. \quad (17)$$

Експлуатаційне розрахункове значення вітрового навантаження визначається за формулою

$$W_e = \gamma_{fe} W_0 C, \quad (18)$$

де γ_{fe} — коефіцієнт надійності за експлуатаційним розрахунковим значенням вітрового навантаження.

У нормах ДБН вперше прийнято, що експлуатаційне розрахункове значення вітрового навантаження W_e залежить від частки часу η , упродовж якого воно може перевищуватися. За даними 195 метеостанцій України були підраховані експлуатаційні розрахункові значення вітрового навантаження W_e , залежні від географічного району і від частки терміну служби конструкції η [22]. Це дало можливість обґрунтувати відповідний коефіцієнт

$$\gamma_{fe} = 0,358 [-\lg(\eta)]^{3/2}. \quad (19)$$

Можна також користуватися відповідною таблицею ДБН, побудованою за формулою (19), згідно з якою $\gamma_{fe} = 0,42 \dots 0,09$ для $\eta = 0,002 \dots 0,1$. Для об'єктів масового будівництва допускається приймати $\eta = 0,02$.

Даючи загальну оцінку українським нормам ДБН В.1.2–2006 «Навантаження та впливи» у частині вітрового навантаження слід наголосити, що вони складені на сучасній методичній основі, наближені до європейських норм Єврокод, базуються на представницькому статистичному матеріалі, більш диференційовані та мають наукове імовірнісне обґрунтування, глибше розроблене, ніж у нормах минулих років.

У наступні роки в Україні тривали ймовірнісні дослідження вітрового навантаження, практичними результатами яких були рекомендації щодо вдосконалення норм проектування. Наукова школа надійності будівельних конструкцій Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка розробила імовірнісний розрахунок елементів на вітрове навантаження [24,25], доповнила імовірнісний опис статичної

складової вітрового навантаження [26,27]. Р.І. Кінаш запропонував альтернативний метод районування вітрових навантажень на території України [21]. Було розроблено пропозиції щодо більш детального вітрового районування гірського Карпатського регіону (у межах Закарпатської області) із запровадженням додаткових 4 районів (з 6-го по 9-й) з характеристичними вітровими навантаженнями в інтервалі 0,6...1,9 кПа [28]. І.М. Добрянським з колегами отримані результати для перевірки положень ДБН щодо профілів вітрового тиску для висотних споруд в умовах міської забудови [29]. В.А. Пашинський розробив нову методику адміністративно-територіального районування вітрових навантажень на будівельні конструкції [30].

Висновки. Показано, що протягом останніх дев'яноста років вітчизняні норми проектування будівельних конструкцій щодо нормування вітрових навантажень зазнали значних змін і розширили свої статистичні основи. Розвинулось територіальне вітрове районування, зросла кількість вітрових районів, особливо на території України. Модифікувалося обґрунтування нормативних (характеристичних) та розрахункових значень вітрового навантаження на основі збільшеного періоду повторюваності. Отримало статистичне обґрунтування експлуатаційне значення вітрового навантаження. Відзначається високий науковий рівень вітчизняних норм ДБН В.1.2-2006 «Навантаження та впливи», які мають сучасний статистичний базис, які асоціюються з нормами Єврокод та забезпечують необхідний рівень надійності будівельних конструкцій. Виділяються нові наукові результати, які можуть бути включені до наступних видань норм вітрового навантаження.

References

1. Spravochnik inzhenera-proyektirovshchika promsooruzheniy. Tom II. Raschetno-teoreticheskiy. Gosstroyizdat, 1934.
2. Retter E.I. Vetrovaya nagruzka na sooruzheniya. Gl. red. stroit. lit, 1936.
3. Barshteyn M.F. Vozdeystviye vetra na vysokiye sooruzheniya. Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy, 1959, №1, S. 19 – 32.
4. Anapol'skaya A.Ye., Gandin L.S. Metodika opredeleniya raschetnykh skorostey vetra dlya opredeleniya vetrovykh nagruzok na stroitel'nyye sooruzheniya. Meteorologiya i gidrologiya, 1958, №10, S. 9 – 17.
5. Kerimov A.A., Israimov A.A. Sravneniye rezul'tatov izmereniya skorosti vetra, osushchestvlenykh razlichnymi priborami. Meteorologiya i gidrologiya, 1970, №11, S. 102 – 104.
6. Klepikov L.V., Otstavnov V.A. Opredeleniye nagruzok pri raschete stroitel'nykh konstruktsey. Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy, 1962, №5, S. 39 – 45.
7. Klepikov L.V. O statisticheskom raspredelenii skorosti vetra. Sbornik trudov «Metallicheskiye konstruktсии», 1975, №119, S. 31 – 40.
8. Zavarina M.V. Stroitel'naya klimatologiya. Gidrometeoizdat, 1976, 321 s.

9. Duchene-Marullar Ph. Etudes des vitesses maximales annuelles de vent pour le calcul des surcharges. Cahier du CSTB, 1972, Liv.131.
10. Borisenko M.M. Vertikal'nyye profili vetra i temperatura v nizhnikh sloyakh atmosfery. Trudy GGO, 1974, № 220, 204 s.
11. Barshteyn M.F. Rukovodstvo po raschetu zdaniy i sooruzheniy na deystviye vetra. Stroyizdat, 1978, 224 s.
12. Davenport A.G. The dependence of wind loads on meteorological parameters. Int. Reseach Seminar on Wind Effects on Building and Structure, Ottawa, 1967.
13. Tseytlin A.A., Bernshteyn A.S., Guseva N.I., Popov N.A Novaya redaktsiya razdela «Vetrovyye nagruzki» glavy SNiP «Nagruzki i vozdeystviya». Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy, 1987, №6, S. 28 – 33.
14. Pichugin S.F. Veroyatnostnoye predstavleniye nagruzok na stroitel'nyye konstruksii. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo, 1995, № 4, S. 12 – 18.
15. Pashynski V.A., Pichugin S.F. Wind Load Probabilistic Description and Value Computation Procedure Adopted for Building Code of Ukraine. Preprints EECWE '94. – Warsaw (Poland), 1994, Part 1, Vol.3, P. 49 – 52.
16. Pichugin S.F. Veroyatnostnyy analiz vetrovoy nagruzki. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo, 1997, №12, S. 13 – 20.
17. Pichugin S.F. Probabilistic Analysis on Wind Load and Reliability of Structures. Proc. Of the 2 EACWE.– Genova (Italy), 1997, Vol. 2, P. 1883 – 1890.
- 18 Pichugin S.F. Probabilistic Specification of Design Wind Load Coefficients. 2nd East European Conference on Wind Engineering. – Prague, 1998, P. 511–515.
19. Pichugin S.F. Sluchaynyye parametry vetrovoy nagruzki. Visnik DonDABA, 2001, vip. 2001-4(29), C. 45 – 50.
20. Pichugin S.F., Makhin'ko A.V. Vetrovaya nagruzka na stroitel'nyye konstruksii. Poltava: Izd-vo «ASMI», 2005, 342 s.
21. Kinash R.I., Burnayev O.M. Vitrove navantazhennya i vitroenerhetychni resursy v Ukraini. L'viv: Vyd-vo naukovy-tekhnichnoyi literatury, 1998, 1152 s.
22. Pashyns'kyi V.A. Atmosferni navantazhennya na budivel'ni konstruksiyi. K.: Vyd-vo «Stal'», 1999, 185 s.
23. Simiu E., Scanlan R.H. Wind Effects on Structures: Fundamentals and Applications to Design. New York: John Wiley, 1996, 704 p.
24. Pichuhin S.F., Severyn V.O. Osoblyvosti imovirnisnogo rozrakhunku elementiv na vitrove navantazhennya. Visnyk DonDABA, 2001, vyp. 2001-4(29), – C. 91–96.
25. Sergiy Pichugin and Vitaliy Severin. Certain problems and probabilistic modelling of wind loads. Proceedings of 3rd East European Conference on Wind Engineering (3rd EECWE'2002), Kyiv, 2002, P. 58 - 60.
26. Pichuhin S.F., Severyn V.O. Imovirnisni modeli atmosfernykh navntazhen'. Proceedings of 2rd International Conference "Problems of the Technical Meteorology", – Lviv, 2002, P. 113 – 118.
27. Pichuhin S.F., Makhin'ko A.V. Imovirnisnyy opys statychnoyi skladovoyi vitrovoho navantazhennya u tekhnitsi absolyutnykh maksymumiv vypadkovoho protsesu. Visnyk DonDABA, vyp. 2003-2 (39), 2003. – S. 76 – 82.
28. Kinash R.I., Huk Y.A.S. Rayonuvannya terytoriyi Zakarpat's'koyi oblasti za vitrovyim navantazhennyam. Zb. nauk. prats' Ukr. naukovy-dosl. ta proektnoho in.-tu stal. konstruksiy im. V.M. Shymanovs'koho, 2010, vyp. 5. K.: Vyd-vo «Stal'», S. 117 – 123.

29. Dobryans'kyu I.M., Lopatka S.S. Aktual'ni problemy doslidzhennya profiliv zminnoho z vysotoyu tysku na budivli i sporudy. Visnyk Natsional'noho universytetu "L'viv's'ka politekhnika", 2002, № 462, S. 41 – 46.

30. Pashyns'kyu V.A. Metodyka administratyvno-terytorial'noho rayonuvannya klimatychnykh navantazhen' na budivel'ni konstruktsiyi. Zb. nauk. prats' «Resursoekonomni materialy, konstruktsiyi, budivli ta sporudy», 2016, vyp. 32. Rivne: NUVHR. – S. 387 – 393.

Список використаної літератури

1. Справочник инженера-проектировщика промсооружений. Том II. Расчетно-теоретический. Госстройиздат, 1934.

2. Ретгер Э.И. Ветровая нагрузка на сооружения. Гл. ред. строит. лит., 1936.

3. Барштейн М.Ф. Воздействие ветра на высокие сооружения. *Строительная механика и расчет сооружений*, 1959, №1, С. 19 – 32.

4. Анапольская А.Е., Гандин Л.С. Методика определения расчетных скоростей ветра для определения ветровых нагрузок на строительные сооружения. *Метеорология и гидрология*, 1958, №10, С. 9 – 17.

5. Керимов А.А., Исраимов А.А. Сравнение результатов измерения скорости ветра, осуществленных различными приборами. *Метеорология и гидрология*, 1970, №11, С. 102 – 104.

6. Клепиков Л.В., Отставнов В.А. Определение нагрузок при расчете строительных конструкций. *Строительная механика и расчет сооружений*, 1962, №5, С. 39 – 45.

7. Клепиков Л.В. О статистическом распределении скорости ветра. *Сборник трудов «Металлические конструкции»*, 1975, №119, С. 31 – 40.

8. Заварина М.В. Строительная климатология. Гидрометеиздат, 1976, 321 с.

9. Duchene-Marullar Ph. Etudes des vitesses maximales annuelles de vent pour le calcul des surcharges. *Cahier du CSTB*, 1972, Liv.131.

10. Борисенко М.М. Вертикальные профили ветра и температура в нижних слоях атмосферы. *Труды ГГО*, 1974, № 220, 204 с.

11. Барштейн М.Ф. Руководство по расчету зданий и сооружений на действие ветра. Стройиздат, 1978, 224 с.

12. Davenport A.G. The dependence of wind loads on meteorological parameters. *Jut. Reseach Seminar on Wind Effects on Building and Structure*, Ottawa, 1967.

13. Цейтлин А.А., Бернштейн А.С., Гусева Н.И., Попов Н.А Новая редакция раздела «Ветровые нагрузки» главы СНиП «Нагрузки и воздействия». *Строительная механика и расчет сооружений*, 1987, №6, С. 28 – 33.

14. Пичугин С.Ф. Вероятностное представление нагрузок на строительные конструкции. *Известия вузов. Строительство*, 1995, № 4, С. 12 – 18.

15. Pashinski V.A., Pichugin S.F. Wind Load Probabilistic Description and Value Computation Procedure Adopted for Building Code of Ukraine. *Preprints EECWE'94. – Warsaw (Poland)*, 1994, Part 1, Vol.3, P. 49 – 52.

16. Пичугин С.Ф. Вероятностный анализ ветровой нагрузки. *Известия вузов. Строительство*, 1997, №12, С. 13 – 20.
17. Pichugin S.F. Probabilistic Analysis on Wind Load and Reliability of Structures. *Proc. Of the 2 EACWE.– Genova (Italy)*, 1997, Vol. 2, P. 1883 – 1890.
- 18 Pichugin S.F. Probabilistic Specification of Design Wind Load Coefficients. *2nd East European Conference on Wind Engineering. – Prague*, 1998, P. 511–515.
19. Пичугин С.Ф. Случайные параметры ветровой нагрузки. *Вісник ДонДАБА*, 2001, вип. 2001-4(29), С. 45 – 50.
20. Пичугин С.Ф., Махінько А.В. Ветровая нагрузка на строительные конструкции. Полтава: Изд-во «АСМІ», 2005, 342 с.
21. Кінаш Р.І., Бурнаєв О.М. Вітрове навантаження і вітроенергетичні ресурси в Україні. Львів: Вид-во науково-технічної літератури, 1998, 1152 с.
22. Пашинський В.А. Атмосферні навантаження на будівельні конструкції. К.: Вид-во «Сталь», 1999, 185 с.
23. Simiu E., Scanlan R.H. Wind Effects on Structures: Fundamentals and Applications to Design. New York: John Wiley, 1996, 704 p.
24. Пічугін С.Ф., Северин В.О. Особливості імовірнісного розрахунку елементів на вітрове навантаження. *Вісник ДонДАБА*, 2001, вип. 2001-4(29), – С. 91–96.
25. Sergiy Pichugin and Vitaliy Severin. Certain problems and probabilistic modelling of wind loads. *Proceedings of 3rd East European Conference on Wind Engineering (3rd EECWE 2002)*, Kyiv, 2002, P. 58 - 60.
26. Пічугін С.Ф., Северин В.О. Імовірнісні моделі атмосферних навантажень. *Proceedings of 2nd International Conference "Problems of the Technical Meteorology"*, – Lviv, 2002, P. 113 – 118.
27. Пічугін С.Ф., Махінько А.В. Імовірнісний опис статичної складової вітрового навантаження у техніці абсолютних максимумів випадкового процесу. *Вісник ДонДАБА*, вип. 2003-2 (39), 2003. – С. 76 – 82.
28. Кінаш Р.І., Гук Я.С. Районування території Закарпатської області за вітровим навантаженням. *Зб. наук. праць Укр. науково-досл. та проектного ін.-ту стал. конструкцій ім. В.М. Шимановського*, 2010, вип. 5. К.: Вид-во «Сталь», С. 117 – 123.
29. Добрянський І.М., Лопатка С.С. Актуальні проблеми дослідження профілів змінного з висотою тиску на будівлі і споруди. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка"*, 2002, № 462, С. 41 – 46.
30. Пашинський В.А. Методика адміністративно-територіального районування кліматичних навантажень на будівельні конструкції. *Зб. наук. праць «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди»*, 2016, вип. 32. Рівне: НУВГП, – С. 387 – 393.

**ЗАСТОСУВАННЯ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ В
АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРОГАХ**

APPLICATION OF METAL STRUCTURES ON HIGHWAYS

Процюк В.О., к.т.н., доц., Шимчук О.П., к.т.н., доц., Талах Л.О., к.т.н., доц., Богданович О.О., магістр (Луцький національний технічний університет)

Protsiuk V.O., Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Shymchuk O.P., Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Talakh L.O., Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Bohdanovych O.O., master (Lutsk National Technical University)

У статті проведено аналіз застосування металевих гофрованих труб під автомобільними дорогами за кордоном та в Україні. Встановлено основні проблеми, які виникли під час експлуатації металевих гофрованих труб. В статті значну увагу приділено закордонним і вітчизняним методам розрахунку напружено-деформованого стану металевих гофрованих труб.

The article discusses the main problems associated with the use of metal structures in road construction. The advantages of artificial structures made of metal in comparison with other materials due to their better physical and mechanical properties are given. The prospect of using metal corrugated pipes instead of ordinary reinforced concrete culverts and small single-span bridges is foreseen.

The article discusses the use of metal corrugated pipes. The first experience of using culverts made of metal corrugated structures begins at the end of the 19th century. The main countries in which metal culverts began to be used are given. In Ukraine, the use of metal corrugated pipes began in the early 2000s. The most famous manufacturer, which is the leader in the market of Ukraine and Europe, is the VIACON company.

The article analyzes the early experience of the operation of metal corrugated pipes and characterizes the main deformations and defects that most often occur during the operation of these pipes. In addition, the main causes of these deformations have been established.

The article provides a concise analysis and comparison of existing mathematical models for calculating the stability and stress-strain state of corrugated metal pipes. Mathematical models of Feldt, Yasevich, Levy, Marston, Spangler, Klein are considered. In addition, the article provides mathematical models of the American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) and CHBDC. Canada Highway and Bridge Design Code (CHBDC), as well as the calculation of metal corrugated pipes for strength and bearing capacity is performed in Ukraine. The analyzed models have their advantages and disadvantages. Each calculation method was improved by introducing coefficients and restrictions.

Summarizing the analysis of the existing models, the authors of the article propose to use the universal method of finite elements for the calculation of corrugated metal structures. This method of computer modeling allows taking into account a wide range of various parameters that are not always possible to use in calculations by conventional analytical methods.

In the final part of the article, the authors pay attention to the advantages of using metal corrugated pipes under highways in comparison with reinforced concrete ones, including economy, strength, seismic resistance, speed and manufacturability of installation.

It is expected that the further development of methods for calculating the stability of structures and the stress-strain state of corrugated metal pipes will allow to increase the percentage of the use of culverts made of corrugated metal under highways.

Ключові слова: *автомобільна дорога, металева гофрована труба, напружено-деформований стан, стійкість, водопропускна труба, міст*

Keywords: *highway, metal corrugated pipe, stressed-deformed state, stability, culvert, bridge*

Вступ. Розвиток сучасних безпечних, комфортних і швидкісних автомобільних доріг потребує застосування в будівництві сучасних і прогресивних матеріалів. Вони повинні бути міцнішими, дешевшими, довговічнішими та надійнішими. Крім того, конструкції повинні вписуватися в ландшафт середовища і мати естетичний вигляд. Цим матеріалом добре себе зарекомендувала сталь.

Фізико-механічні властивості сталей, що застосовуються для виготовлення металевих конструкцій, високі експлуатаційні характеристики зробили можливим широке використання їх у будівництві. Висока міцність, легкість та надійність сталі дозволили зводити високі та великопрогонові споруди [1]. Найбільшого розповсюдження у дорожній галузі металеві конструкції набули при будівництві мостів, водопропускних труб, дорожнього огороження, скотопронів та транспортних тунелів.

Відповідно до Програми Президента «Велике будівництво» (розпочато у березні 2020 року) передбачається капітальний ремонт не тільки елементів проїзної частини, узбіч і укосів, а ще із ремонт або реконструкцію штучних споруд таких як мости та водопропускні труби. В проєктах на капітальний ремонт все частіше проєктанти пропонують заміну старих залізобетонних труб на металеві гофровані, а малі мости, що знаходяться в аварійному стані, пропонують замінювати металевими гофрованими трубами.

Аналіз досліджень. Перший досвід експлуатації водопропускних труб із металевих гофрованих конструкцій починається з кінця XIX століття (1875 р.) [2-6]. Спершу було запропоновано замінити дерев'яні

водо-пропускні труби на металеві в Російській імперії, пізніше (1896 р.) металеві труби почали застосовувати у США. В країнах Європи та в Японії застосування металевих труб відбулося значно пізніше – у другій половині ХХ століття [6]. Найбільш відомими виробниками, що є лідерами на ринку України і Європи, є норвезько-шведсько-фінська компанія VIACON та італійська FRACASSO. Вони забезпечують потребу в металоконструкціях з гофри для країн Європи, Америки, Африки та Австралії.

З тих пір пройшло більше століття, а тому накопичився значний досвід експлуатації даних конструкцій, що працюють під насьпиами автомобільних доріг і сприймають навантаження від транспортних навантажень. Значна кількість наукових праць [2, 7-9] приділена дослідженню металевих гофрованих конструкцій у процесі інтенсивної експлуатації, в яких описуються види та причини руйнувань даних конструкцій.

Як свідчить ранній досвід експлуатації металевих гофрованих труб, значна частина труб отримала пошкодження у вигляді деформування частини труби всередину через низьку експлуатаційну надійність конструкції [10]. Головними причинами утворення недопустимих деформацій, а саме зменшення вертикального та збільшення горизонтального діаметрів отвору труби, а також повного руйнування є недосконалість аналітичних методів розрахунку товщини стінок труби, нерівномірне ущільнення ґрунту під час засипки труби, що призводить до розмивів, неприйнятний вибір геометричної форми отвору труби.

Для недопущення деформації необхідно у подальшому розвинути методи розрахунку стійкості металевих гофрованих труб, які повинні працювати спільно з ґрунтом насипу.

Постановка мети і задач досліджень. Метою наукової статті є аналіз і порівняння існуючих математичних моделей розрахунку стійкості металевих гофрованих труб. Подальший розвиток методів розрахунку стійкості конструкцій металевих гофрованих труб дозволить збільшити відсоток застосування водопропускних труб із гофрованого металу під автомобільними дорогами.

Виклад основного матеріалу. Значний внесок у розвиток будівельної галузі поклато застосування у будівельних конструкціях сталі. Завдяки своїй легкості, пружності, міцності на розтяг, довговічності та перевазі у монтажі, сталь завоювала лідерство в будівельній галузі. Зниження ваги конструкцій через застосування сталі дозволило зменшити витрати на влаштування фундаментів та опор, дозволило збільшити довжини прольотів великих мостів.

У дорожньому будівництві сталь найчастіше застосовують у мостових конструкціях, у вигляді металевих арок склепіння, пілонів, тросів підвісного полотна, прогонів полотна. Трохи рідше сталь

застосовують під час влаштування габіонів у якості сітки, що формує каркас конструкції.

Металеві труби почали поступово застосовуватись для перепуску дощових, талих вод і транспортних тунелів під автомобільною дорогою, для влаштування скотопрогону, а також при реконструкції малих мостів.

У процесі проектування металевих гофрованих труб проектувальнику потрібно задатися параметрами конструкції та вибрати оптимальний метод розрахунку її напружено-деформованого стану. В науковій статті проведемо аналіз методів оцінки стійкості та несучої здатності труб із металевих гофрованих труб.

Перші методи оцінювання несучої здатності з'явилися паралельно з будівництвом металевих гофрованих труб. На межі XIX і XX століть для розрахунку застосовували метод Фельдта [3]. Даний метод передбачає перевірку допустимих напружень, що виникають у стінках металеві гофрованої труби від дії згинального моменту і стискаючої сили. Проте дана модель застосовується лише для труб діаметром менше 1,5 м та не враховує фізико-механічні характеристики ґрунтової засипки:

$$\sigma = \frac{N}{F} + \frac{M}{W} \leq \sigma_{cp} \quad (1)$$

У цей період Ясевич запропонував гіпотезу про рівномірний розподіл тисків на трубу з усіх сторін [3, 17], розрахунок дії критичного руйнівного тиску для металеві труби виконується за формулою:

$$p = c \sqrt{\frac{W}{dl}}, \quad (2)$$

де: c – емпіричний коефіцієнт; рівний 6; d – діаметр труби; l – довжина труби.

І в попередній моделі, запропонованій Фельдтом, модель Ясевича також застосовується для труб діаметром до 1,5 м. Ще одним недоліком даної моделі є емпіричний коефіцієнт c .

Ще одна методика була розроблена Леві у 1905 р. У своїх роботах ним було враховане навантаження на трубу від однієї осі рухомого навантаження. Розподіл тиску в ґрунті приймається під кутом 45°. Напруження за методикою Леві визначається за формулою:

$$\sigma = \frac{qr}{\omega} \leq \sigma_{zp} \quad (3)$$

де: r – радіус труби; q – інтенсивність рівномірно розподіленого навантаження; ω – площа перерізу кільця труби.

Використання згаданих моделей у практичному розрахунку металевих гофрованих труб показало значне розходження результатів у порівнянні із експериментальними даними [11]. Тому було прийнято рішення про необхідність подальшого розвитку методів розрахунку металевих гофрованих труб із урахуванням взаємодії із ґрунтом земляного полотна.

У 1941 у США Spangler M.G. і Anson Marston запропонували модель Marstona–Spanglera для розрахунку металевих гофрованих труб круглого перерізу і малого діаметру. Дана модель базується на основі натурних експериментів труб. В методиці прийнято припущення про рівномірний вертикальний тиск ґрунтової засипки на верхню та нижню поверхні труби, а бокові стінки труби зазнають дії горизонтального тиску ґрунтової засипки, який змінюється за параболічним законом.

Автори методики зазначають, що руйнування труб відбувалося в процесі зменшення вертикального діаметра до 20%. При цьому діаметр і товщина стінок труби та опір ґрунту не впливають на руйнування труби.

М. Шпенглер у своїй роботі [12] наводить формулу для визначення деформації горизонтального діаметру труби:

$$\Delta D_z = F_g \cdot F_k \cdot \frac{Qr^3}{EI + 0,061 \cdot E'_{zp} \cdot \kappa^4}, \quad (4)$$

де: F_g – емпіричний коефіцієнт ($F_g=1,25-1,5$), який враховує переміщення ґрунту насипу; F_k – коефіцієнт умов обпирання труби на основу; $Q=2qr$ – вертикальне навантаження на одиницю довжини труби; E_{zp} – модуль горизонтальної деформації ґрунту насипу.

У подальшому модель Marstona–Spanglera була розвинена у працях Г.К. Клейна [13]. У 1951 ним була запропонована модель розрахунку водопропускних труб. Клейн припускає зменшення напружень у матеріалі конструкції опір ґрунту, що діє на металеву гофровану трубу. Для цього у модель Фельдта ним введено коефіцієнт, що зменшує дію згинального моменту ξ . Розрахунок напружень, що виникають у стінках металевих гофрованих труб, розраховують за наступною формулою:

$$\sigma = \frac{\xi M}{W} \pm \frac{N}{A} \leq \sigma_d, \quad (5)$$

де: M – згинальний момент; W – момент опору; N – поздовжня осьова сила; A – площа перерізу стінки конструкції на довжині один метр; σ_d – допустиме напруження у металі конструкції.

У США на основі норм проектування мостів була розроблена аналітична методика AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) [8]. Методика AASHTO в розрахунках враховує лише осьові сили у конструкції труби, але при цьому нехтують впливом згинальних моментів. Застосування даної методики дозволяє оцінити міцність швів, а також втрату стійкості стінок конструкції та монтажну жорсткість.

При цьому методика застосовується під час розрахунку конструкцій радіусом більше 4 м та має еліптичний поперечний переріз. За даною моделлю сила тиску у стінці конструкції визначається за формулою:

$$T = 0,5(\alpha_D \cdot P_D + \alpha_L \cdot P_L \cdot \phi) \cdot D_h \quad (6)$$

де D_h – вертикальний діаметр споруди, P_D , P_L – постійне та змінне рівномірно-розподілене навантаження на рівні склепіння конструкції, ϕ – динамічний коефіцієнт, α_D – коефіцієнт постійного навантаження, α_L – коефіцієнт змінного навантаження.

Для оцінки стійкості та несучої здатності металевих гофрованих труб розглянемо також канадську методику CHBDC. В цій моделі так само, як і в попередній аналітичній моделі AASHTO, у розрахунках необхідно враховувати дію осьових сил, що виникають у металевій гофрованій трубі, при цьому нехтуючи згинальними моментами [9, 11]. Наведену методику часто використовують у процесі виконання проектних робіт із розрахунку арочного поперечного перерізу.

Стискаюче зусилля у стінці конструкції визначається за методом CHBDC [14]:

$$T = \alpha_D \cdot T_D + \alpha_L \cdot T_L \quad (7)$$

де α_D – коефіцієнт, що враховує постійні навантаження, T_D – сила в стінці конструкції, викликана дією постійного навантаження, α_L – коефіцієнт, що враховує змінні навантаження, T_L – сила в стінці конструкції, спричинена дією змінного навантаження.

Пізніше в Канаді з'явилася методика CHBDC, що є аналогом до попередньої. В цій методиці враховується зв'язок між значеннями

грунтової засипки та жорсткості конструкції. Міцність стінки труби при стиску та жорсткість конструкції перевіряють у зібраному стані з урахуванням взаємодії із ґрунтом насипу.

Загальна вертикальна сила, що діє у стінці конструкції, визначається за формулою:

$$T = \alpha_D \cdot T_D + \alpha_L \cdot T_L \cdot \varphi_d \quad (8)$$

Як бачимо, у цю формулу введено динамічний коефіцієнт φ_d . Значення цього коефіцієнта залежить від висоти насипу над трубою.

В Україні розрахунок металевих гофрованих труб на міцність та несучу здатність виконується відповідно до ДБН В.1.2-15:2009 [15] та ВБН В.2.3-218-198:2007 [16] за формулою:

$$\frac{N}{A} \leq R_y m \quad (9)$$

де: N – нормальне (тангенціальне) зусилля у гофрованій конструкції від розрахункових навантажень, що припадає на довжину λ однієї гофри труби; A – площа перерізу однієї хвилі гофри; R_y – розрахунковий опір сталі на межі текучості; $m=0,9$ – коефіцієнт умов роботи споруди.

Із розвитком аналітичних методів та програмних комплексів на сьогоднішній день для розрахунку металевих гофрованих конструкцій найбільш універсальним методом є метод скінчених елементів (МСЕ). Даний метод комп'ютерного моделювання дозволяє враховувати широкий спектр різноманітних параметрів, які не завжди можна використовувати в розрахунках звичайними аналітичними методами. Тому, використання методу скінчених елементів дозволяє отримати точніші результати напружень і деформацій, що підтверджується науковими роботами [17].

Незважаючи на таку велику кількість математичних моделей та їх неточності, металеві гофровані труби все частіше починають застосовувати в Україні. Це пов'язано, насамперед, із значними перевагами в порівнянні із традиційними залізобетонними трубами.

До основних переваг застосування металевих будівельних конструкцій слід віднести швидкість монтажу. Будівництво залізобетонних споруд потребує дотримання технологічних перерв, а також температурного режиму, що пов'язані із періодом тужавіння бетону. Монтаж елементів гофрованих металевих конструкцій не залежить від температурного режиму та не потребує технологічних перерв.

Менша вага металевих конструкцій у порівнянні із залізобетонними дозволяє зменшити витрати на доставку металевих елементів на об'єкт та

не потребує використання спеціальної будівельної техніки під час монтажу конструкцій.

Маючи високу міцність та хорошу гнучкість, металеві гофровані труби можна застосовувати в районах із високою сейсмічною активністю.

Окрім низьких витрат на підтримання працездатності конструкції, слід зазначити, що вартість монтажу металевих гофрованих труб на 15%-20% нижча за вартість залізобетонних.

Висновки. Використання гофрованих металевих труб у дорожньому будівництві дозволяє зменшити вартість будівництва штучних споруд, насамперед, малих однопролітних мостів. Високі міцнісні характеристики сталі дозволяють застосовувати металеві водопропускі труби під автомобільними дорогами та сприймати високі навантаження від транспортних засобів. Проте, під час конструювання і визначення напружено-деформованого стану труби, необхідно ретельно ставитися до вибору геометричних характеристик стінки гофрованої труби та обирати відповідні математичні моделі розрахунку, що в повній мірі відповідають вихідним умовам проектування.

References

1. Talakh L.O. Metalevi konstruktsiyi v suchasnomu budivnytstvi / L.O. Talakh, O.P. Shymchuk, V.O. Protsyuk, A.S. Semerey, YA.I. Panasyuk // *Suchasni tekhnolohiyi ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi : zb. nauk. prats' / Luts'kyu nats. tekhn. un-t ; - Luts'k : Luts'kyu NTU, 2020 – Vyp. 13. – S. 104–111.*
2. Kolokolov N.M. Metallicheskiye hofryrovannye truby pod nasypyamy / N.M. Kolokolov, O.A. Yankovskyy, K.B. Shcherbyna, S.É. Chernyakhovskaya; pod obshch. red. N.M. Kolokolova. – M.: Transport, 1973 – 120 s.
3. Hertsoh A.A. Hofryrovannye truby na avtomobyl'nykh dorohakh. – M.: Hushosdor, 1939. – 112 s.,
4. Luchko Y.Y. Mosty i truby z hofrovanykh metalevykh konstruktsiy ta monitorynh hruntovykh osnov dorih i sporud: Monohrafiya / Y.Y. Luchko, V.V. Koval'chuk, I.B. Kravets'. – L'viv: Svit, 2019. – 260 s.
5. Luchko Y.Y. Tekhnichnyy stan transportnykh sporudi z metalevykh hofrovanykh konstruktsiy / Luchko Y.Y., Koval'chuk V.V. // *Mosty ta tuneli: teoriya, doslidzhennya, praktyka. 2021. Vyp. 19. S. 38–50.*
6. Koval' P.M. Normuvannya pry proektuvanni i budivnytstvi sporud z metalevykh hofrovanykh konstruktsiy / P.M. Koval', I.P. Bab"yak, T.M. Sitdykova // *Visnyk Dnipropetr. nats. un-tu zal. transp. im. ak. V. Lazaryana. – Dnipropetrovs'k: Vydavnytstvo DNUZT, 2010. – № 39. – S. 114–117.*
7. Yankovskyy O.A. Sooruzhenye metallicheskykh hofryrovannykh vodoprusknykh trub: Zarubezh. opyt / O.A. Yankovskyy, K.A. Cherkasov. – M., 1978. –34 s.

8. AASHTO: Standart Specifications for Highway Bridges. American Association of State Highway and Transportation Officials, 444 N. Capitol St., N. W., Ste. 249. Washington, D. C., 2001.
9. CHBDC. Canada Highway and Bridge Design Code, Section 7 – Code, Buried Structures (Final), February 1998. CSPI 2002.
10. Koval'chuk V.V. Nesucha zdatnist' transportnykh sporud iz metalevykh hofrovanykh konstruksiy v umovakh ekspluatatsiyi : dys. ... d-ra tekhn. nauk : 05.23.01 / Dniprovs'kyy natsional'nyy universytet zaliznychnoho transportu im. akadem. V.Lazaryana. Dnipro, 2019. 445 s.
11. Luchko Y.Y. Metody otsinky napruzhenno-deformovanoho stanu metalevykh hofrovanykh konstruksiy / Y.Y. Luchko, YU.YE. Koval'chuk, I.B. Kravets' // Zbirnyk nauk. prats' Dnipropetrovs'koho nats. un-tu zalizn. transportu im. akadem. V.Lazaryana «Mosty i tuneli: Teoriya, doslidzhennya, praktyka». – Dnipropetrovs'k, 2017. – № 11 – S. 30–41.
12. Spangler M. G. Factors of safety in the design of buried pipelines // Highway Res.Rec. – 1969. – № 269.
13. Kleyn H.K. Raschët podzemnykh truboprovodov. M., Stroyizdat, 1969. -240 s.
14. Kunecki B. Zachowanie się ortotropowych powłok walcowych w ośrodku gruntowym pod statycznym i dynamicznym obciążeniem zewnętrznym. Rozprawa doktorska / Instytut Budownictwa Politechnika Wroclawska, Raport serii PRE nr 14/2006. – Wrocław, 2006.
15. DBN V.1.2-15:2009. Sporudy transportu. Mosty ta truby. Navantazhennya i vplyvy. K.: Minrehionbud Ukrainy, 2009. – 104 s.
16. VBN V.2.3-218-198:2007. Proektuvannya ta budivnytstvo sporud iz metalevykh hofrovanykh konstruksiy na avtomobil'nykh dorohakh zahal'noho korystuvannya. K.: Ukravtodor, 2007. – 75 s.
17. Janusz L. Obiekty inzynierskie z blach falistych. Projektowanie i wykonawstwo / L. Janusz, A. Madaj. – Wrocław, 2007., Machelski C. Modelowanie mostowych konstrukcji gruntowo-powłokowych. – Wrocław: Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, 2008.

Список використаної літератури

1. Талах Л.О. Металеві конструкції в сучасному будівництві / Л.О. Талах, О.П. Шимчук, В.О. Процюк, А.С. Семерей, Я.І. Панасюк // Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві: зб. наук. праць / Луцький нац. техн. ун-т ; - Луцьк : Луцький НТУ, 2020 – Вип. 13. – С. 104–111.
2. Колоколов Н.М. Металлические гофрированные трубы под насыпями / Н.М. Колоколов, О.А. Янковский, К.Б. Щербина, С.Э. Черняховская; под общ. ред. Н.М. Колоколова. – М.: Транспорт, 1973 – 120 с.
3. Герцог А.А. Гофрированные трубы на автомобильных дорогах. – М.: Гумосдор, 1939. – 112 с.
4. Лучко Й.Й. Мости і труби з гофрованих металевих конструкцій та моніторинг ґрунтових основ доріг і споруд: Монографія / Й.Й. Лучко, В.В. Ковальчук, І.Б. Кравець. – Львів: Світ, 2019. – 260 с.
5. Лучко Й.Й. Технічний стан транспортних споруд з металевих гофрованих конструкцій / Лучко Й.Й., Ковальчук В.В. // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. 2021. Вип. 19. С. 38–50.

6. Коваль П.М. Нормування при проектуванні і будівництві споруд з металевих гофрованих конструкцій / П.М. Коваль, І.П. Баб'як, Т.М. Сітдикова // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту зал. трансп. ім. ак. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ: Видавництво ДНУЗТ, 2010. – № 39. – С. 114–117
7. Янковский О.А. Сооружение металлических гофрированных водопропускных труб: Зарубеж. опыт / О.А. Янковский, К.А. Черкасов. – М., 1978. –34 с.
8. AASHTO: Standart Specifications for Highway Bridges. American Association of State Highway and Transportation Officials, 444 N. Capitol St., N. W., Ste. 249. Washington, D. C., 2001.
9. CHBDC. Canada Highway and Bridge Design Code, Section 7 – Code, Buried Structures (Final), February 1998. CSPI 2002.
10. Ковальчук В.В. Несуча здатність транспортних споруд із металевих гофрованих конструкцій в умовах експлуатації : дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.01 / Дніпровський національний університет залізничного транспорту ім. академ. В.Лазаряна. Дніпро, 2019. 445 с.
11. Лучко Й.Й. Методи оцінки напружено-деформованого стану металевих гофрованих конструкцій / Й.Й. Лучко, Ю.Є. Ковальчук, І.Б. Кравець // Збірник наук. праць Дніпропетровського нац. ун-ту залізн. транспорту ім. академ. В.Лазаряна «Мости і тунелі: Теорія, дослідження, практика». – Дніпропетровськ, 2017. – № 11 – С. 30–41.
12. Spangler M. G. Factors of safety in the design of buried pipelines // Highway Res.Rec. – 1969. – № 269.
13. Клейн Г.К. Расчёт подземных трубопроводов. М., Стройиздат, 1969. -240 с.
14. Kunecki B. Zachowanie się ortotropowych powłok walcowych w ośrodku gruntowym pod statycznym i dynamicznym obciążeniem zewnętrznym. Rozprawa doktorska / Instytut Budownictwa Politechnika Wroclawska, Raport serii PRE nr 14/2006. – Wrocław, 2006.
15. ДБН В.1.2-15:2009. Споруди транспорту. Мости та труби. Навантаження і впливи. К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 104 с.
16. ВБН В.2.3-218-198:2007. Проектування та будівництво споруд із металевих гофрованих конструкцій на автомобільних дорогах загального користування. К.: Укравтодор, 2007. – 75 с.
17. Janusz L. Obiekty inżynierskie z blach falistych. Projektowanie i wykonawstwo / L. Janusz, A. Madaj. – Wrocław, 2007., Machelski C. Modelowanie mostowych konstrukcji gruntowo-powłokowych. – Wrocław: Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, 2008.

**GABION RETAINING WALLS:
FEATURES OF CALCULATION AND DESIGN**

**ГАБІОННІ ПІДПІРНІ СТІНИ:
ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ ТА ПРОЕКТУВАННЯ**

Rotko S.V., Ph.D. in Engineering, Associate Professor (Lutsk National Technical University), Korin` T. V., master, Manuel Teixeira Braz César, Director of the Master's Degree in Construction Engineering ESTiG (Polytechnic Institute of Bragança)

Ротко С.В., к.т.н., доц. (Луцький національний технічний університет, Луцьк), Корінь Т.В., магістр, Мануель Тейшейра Браз Сезар (Політехнічний інститут, м. Браганса)

The results of the master's research on calculation and construction of the gabion retaining wall are given. The results of the influence of various factors on its stability are analyzed

Наведено результати магістерського дослідження з розрахунку та конструювання габіонної підпірної стіни. Проаналізовано результати впливу різних факторів на її стійкість.

На початку дослідження було обрано тип і форму конструкції підпірної стінки, згідно з прив'язкою до місцевих умов, до конструкції підсилюваного насипу, призначено основні розміри. При розрахунку габіонної підпірної стіни враховували її зовнішню і внутрішню стійкість. Зовнішню стійкість стіни оцінювали на опір зсуву, перекидання і втрату несучої здатності основи. Внутрішню стійкість перевіряли шляхом розрахунку міцності в найбільш небезпечних перерізах (у місцях з'єднання габіонів між собою).

У роботі було виконано вісім віariantів розрахунків, перший – із заданими вихідними даними, решта – зі зміною певних параметрів, таких як кут нахилу стіни, пористість габіонів, висота та ширина габіонів, зміщення габіонних ящиків один відносно одного, наявність чи відсутність геотекстилю в основі конструкції.

Аналіз впливу змінюваних параметрів на стійкість конструкції габіонної підпірної стіни показав, що при збільшенні кута нахилу стіни до 6° (2-й варіант розрахунку) стійкість підпірної стіни проти ковзання і перекидання збільшувалась на 9,25% і 6%, відповідно. При збільшенні пористості габіонів з 30 до 40%, зменшенні ширини основи до 4 м і збільшенні висоти стіни на один ряд габіонів (до 8 м), а також при вкладанні геотекстилю в основу стійкість стіни знижувалась на 12,2% - 50,2% (варіанти розрахунків 3-6). При збільшенні величини зміщення габіонів кожного ряду з 0,5 м до 0,6 м стійкість стіни проти ковзання зростала на 29,7%, а проти перекидання – на 18,4%; додаткове збільшення кута нахилу стіни при цьому на 1° підвищувало ці показники до 44% і 28,4%, відповідно.

Keywords: gabions, retaining wall, calculation, stability

Ключові слова: габіони, підпірна стіна, розрахунок, стійкість

Formulation of the problem. Experienced architects and builders know how to turn the weak spots of the site with slopes in interesting and profitable decisions in various aspects, so most often in such situations the retaining walls are used to strengthen the slopes. Unlike concrete and reinforced concrete, such constructions from gabions are advantageously distinguished by the simplicity and speed of installation, under any weather conditions, at any time of the year, sometimes with the use of a minimum of machines and special equipment, often involving both skilled and unskilled labor. The gabion retaining walls are the best in terms of complexity and cost of construction. Therefore, modeling of the correct approach to the design and calculation of gabion retaining walls, observance of technology of their arrangement and maintenance, understanding of possibilities of solution of ecological urban planning problems, which can be avoided, using gabion structures- is relevant.

Analysis of known researches and publications. Gabions are divided into different categories, depending on the material of manufacture, structural features, type of mesh, functional purpose and other aspects. Consequently, each of the gabions has its own specific name, form and purpose. According to structural features, the gabions are divided into: basket, mattress, cylindrical. Baskets gabions or "Jumbo" are the most common, the main areas of their use are construction of retaining walls; strengthening of roads and railways; strengthening of slopes and dams, banks, protection against erosion and landslides; construction of fences, foundations, terraces, parapets; manufacturing of decorative elements in landscape design.

Gabion structures have gained considerable popularity due to their advantages. They are strong and durable, flexible and permeable, attractive and economical [1]. But perhaps the most important advantage is their environmental friendliness. Among a number of ecological problems of our time one of the most influential and least controlled is the problem of carbon dioxide emissions [2]. Our future, the future of the planet and humanity in general depends on their control. Compared to, for example, a concrete retaining wall, a gabion wall of the same height will reduce these emissions by 80%. In addition, they can be reduced by absorption by vegetation that appears over time on gabion structures.

These structures do not require powerful foundations - due to the elasticity of the mesh, the structure tolerates small shifts and subsidence of the soil quite well. The structure of the gabion wall has good water permeability, so drainage is not necessary.

Gabion structures do not prevent the growth of vegetation and over time become part of the natural landscape [3]. They are well suited to any style of the site, almost completely merging with it, perfectly complementing the aesthetic

value of nature [4]. These are stable structures that do not require special care. If all rules and technologies were taken into account during construction, then gabion structures can last 50-100 years or more. Over the years, gabion structures do not lose their purpose [5]. They are ideal for all types of soil and climate conditions. The designed structures are also used as cooling systems in hot climates, providing passive cooling [6].

The objective is to study the calculation method and features of the design of gabion retaining walls, to analyze the impact of changes in wall parameters of the wall on the stability of the structure.

The main tasks of the research:

- to determine the modern tendencies of application of gabion constructions;
- determine the advantages and disadvantages of using gabions for the construction of retaining walls;
- to investigate the method of calculation of gabion retaining walls;
- to perform the calculation of the retaining wall under different initial conditions;
- to analyze the impact of various factors on the stability of the gabion retaining wall.

Description of article's main material

The construction of a gabion retaining wall can be different, depending on the angle of the slope and the load on the wall (Fig. 1).

As for the technology of construction of gabion retaining walls, at the first stage, a construction project is developed, which describes in detail the technology and basic rules of execution of works [3].

The storage gabion boxes are transported folded way to save space. The wire used for the manufacture of gabions has a strength boundary of 380-500 MPa and an elongation of up to 12%. The main requirements for the mesh are corrosion resistance and tensile strength.

Then directly on the place, the boxes are connected into parallelepipeds using lacing wire or fasteners made of stainless steel, galvanized rings, depending on the specifications.

Then prepared empty gabions are installed next to the ones already filled with stones in place according to the project and tied to them. In order to fix the lower gabions in the design position, metal rods are used, which are driven into the corners to pull out the gabions to give them a stable shape [3,7].

A solid stone material (granite, basalt, slate, rubble, pebbles, etc.) serves as an aggregate. When filling the gabion, tensioning wires are used, which in the future will protect the wall from bulging, providing a smooth front surface.



Fig. 1. Examples of gabion retaining walls [6]

General design principles. Gabion retaining wall is a flexible structure that holds the soil with its own weight. It is constructed according to the same principle as a gravity wall: a significant mass of stone in gabions must resist shear forces from the soil and external loads. At the same time, the gabion mesh should hold the stones inside with a slight deformation that will not affect aesthetics and internal stability [8].

Designing, it is necessary to make an accurate calculation of the height and thickness of the retaining wall, since the reliability and quality of the gabion structure will depend on this [9]. It is necessary to start with the specification of geometric dimensions and the number of gabions, then the dimensions are specified in further calculations according to limit states [7].

According to the first group of limit states, which involves the loss of bearing capacity or significant damage, the following calculations are performed:

- general stability (external stability):
 - resistance of the wall against displacement on the base;
 - resistance of the wall against overturning;
 - strength of the soil base;
- internal stability:
 - displacement of some gabions relative to others;
 - gabion strength as a structural element.

According to the second group of limit states (unsuitability for normal operation), the calculation includes a check for permissible deformations during operation of the structure. The calculation is carried out on the effect of normative loads, that is, the coefficients of the reserve in relation to the load and materials accept equal units [7].

The front faces of gabion retaining walls can be stepped and smooth (vertical or inclined). Depending on local conditions and initial data, the configuration of gabion walls can be different. In this study, a wall with a stepped face front is adopted.

The design of gabion retaining walls begins with the collection of initial data. They should cover the entire range of information necessary for the analysis of the state of the embankment, the determination of the forces acting on the supporting gabion structures, the calculations of the main parameters of the structures, their reinforcement, the development of technologies for the arrangement of retaining walls and their technical and economic assessment [3].

The basic for designing gabion structure are: physical and mechanical characteristics of soils, requirements to drainage, width of the base, depth of laying, angle of inclination, loading, density of gabions, volume of backfill, presence of seismic influences [8].

Traditionally, due to the porosity of gabions, drainage systems for gabion walls are not suitable, unlike concrete or reinforced concrete. If the construction site is dominated by clay or sandy soils, it makes sense to provide a geotextile filter between the wall and the gabion.

The width of the base of the gabion wall for a height of H from 1 m. to 6 m. is recommended from 0.6 to $0.75 H$, and for a height of more than 6 m. to 10 m. - $0.55-0.65 H$ and to meet the requirements of the project [8].

The minimum depth of gabion retaining wall must be not less than 0.5 m. for flat surface at H 1 m. to 6 m. and 1 m. for H 6 m. to 10 m. (as per IS 14458 part 1).

The depth of freezing, shrinkage and erosion of the soil, the presence of seismic activity and water washing also affect the depth of laying. Usually, the minimum depth for any structure is taken 0.5 m. The exception is the structure that is erected on rocky soils. In this case, the depth of the wall can be less, due to the fact that the base is a priori strong and the earthwork is much more complicated. Here, respectively, the depth can be 0.3-0.5 m., and the foundation can be leveled by installing dowels and concreting the base [8].

The norms recommend placing a gabion wall at an angle of $3-6^\circ$ to the vertical. The wall can also be vertical, and arrange for the gabions to be offsetted to the outside.

Methodology of construction and calculation of a gabion wall. The gabion gravity wall should be designed taking into account the possible schemes of its destruction, as shown in fig. 2 [3,8].

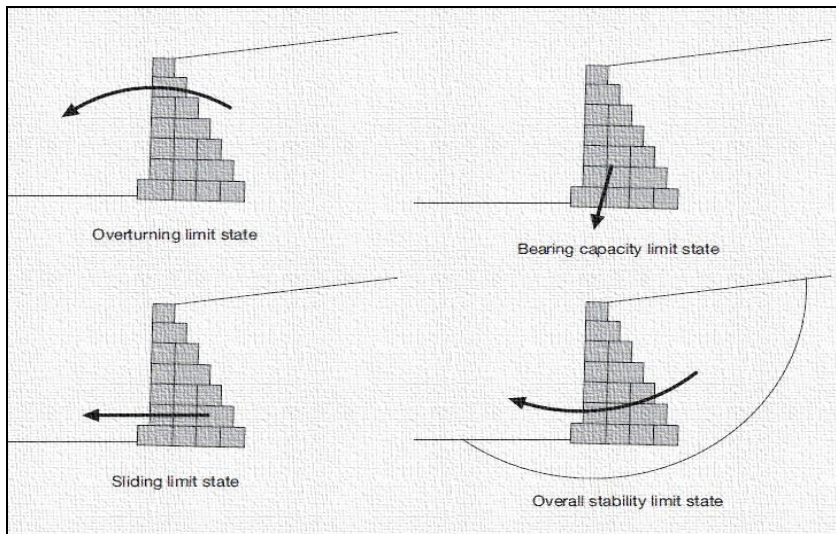


Fig. 2. Possible schemes of destruction of the gabion gravity wall [available online]

First, the type and shape of the structure of the retaining wall is chosen, according to the local conditions, the structure of the reinforced embankment, the main dimensions of the wall are assigned. The height of the wall should ensure the stability of the upper part of the slope (embankment). The width of the gabions that make up it and the shape of the wall are set under the condition of the wall's resistance against shifting and overturning, additionally checked by calculations to estimate the bearing capacity of the base and to estimate the internal stability of the wall [3,7].

The external and internal stability of the wall is considered. The external stability of the wall is assessed by resistance to shear, overturning and loss of bearing capacity of the base. The internal stability is checked by calculating the strength in the most dangerous intersections (in the places where gabions are connected to each other) [3].

As shown in fig. 3, the main forces acting on the walls of the gabions are the vertical forces from the weight of the gabions and the lateral pressure of the earth acting on the back surface.

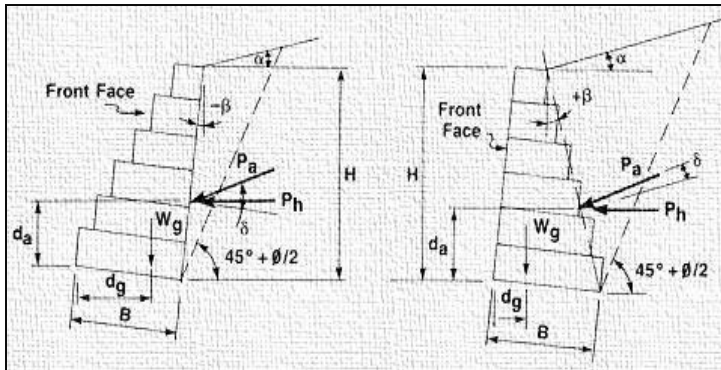


Fig. 3. Construction of the gravity wall: a- stepped front face; b- stepped back face [10]

Calculation and parametric analysis of the retaining wall

The Portuguese program GAWAC WIN 1.0 was used to design the gabion retaining wall. Eight variants of calculations were carried out, the first - with the given initial data (Table 1), the rest - with a change of certain parameters, such as the angle of inclination of the wall, the porosity of the gabions, the height and width of the gabions, the offset of the gabion boxes relative to each other, the presence or absence of geotextiles in based on the design.

The wall construction area is Bragança, Portugal, the backfill soil is sand-gravel, and the gabion filler is granite.

Initial data

Table 1

Symbol	Name of value	Value	Unit of measure
H	Wall Height	7	m
q	Surcharge	5	kN/m
α	Backfill slope angle	20	deg
β	Back Face slope angle	5	deg
φ	Soil friction angle	40	deg
w_s	Soil density	20	kN/m ³
w_g	Gabion fill density	18	kN/m ³
P_b	Soil bearing pressure	300	kPa
B	Width of the base	4.5	m
δ	Angle of wall friction	5	deg
	Porosity of gabions	30	%
	Presence of geotextile in the base	No	

Table 2

Calculation option	Parameters that were changed:
1	–
2	- Changed the angle of inclination of the wall from 5° to 6°;
3	- increased porosity of gabions from 30% to 40%; - geotextile in the base: available (reduction of friction by 5%);
4	- added the 8th layer, height: H = 8m; - reduced base width: B = 4m.
5	- increased porosity of gabions from 30% to 40%; - geotextile in the base: available (reduction of friction by 5%); - added the 8th layer of gabions, height: H = 8m; - reduced base width: B = 4m.
6	- increased the angle of inclination of the wall from 5° to 6°; - increased porosity of gabions from 30% to 40%; - geotextile in the base: available (reduction of friction by 5%); - added the 8th layer of gabions, height: H = 8m; - reduced base width: B = 4m.
7	- increased displacement of gabions relative to each other from 0.5 m to 0.6 m.;
8	- increased the angle of inclination of the wall from 5° to 6°; - increased displacement of gabions relative to each other from 0.5 m to 0.6 m.

Analysis of the influence of changing parameters on the stability of the gabion retaining wall structure showed that when the angle of inclination of the wall increased to 6° (2nd calculation option), the resistance of the retaining wall against sliding and overturning increased by 9.25% and 6%, respectively. When increasing the porosity of gabions from 30 to 40%, reducing the width of the base to 4 m. and increasing the height of the wall by one row of gabions (up to 8 m.), as well as when inserting geotextiles on the base, the stability of the wall decreased by 12.2% - 50.2% (calculation options 3-6). With the increase in the size of the gabions displacement of each row from 0,5 m to 0,6 m the wall stability against sliding was increased by 29.7%, and against overturning by - 18.4%; an additional increase in the angle of inclination of the wall by 1° increased these indicators to 44% and 28.4%, respectively.

Analysis of the stability of the gabion retaining wall

Аналіз стійкості конструкції	Calculation options							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Active thrust:	79.14	75.42	79.14	107.29	107.29	101.71	60.84	56.64
Point of application ref. To x axis	4.68	4.71	4.68	4.21	4.21	4.25	4.87	4.90
Point of application ref. To y axis	1.88	1.79	1.88	2.24	2.24	2.18	1.83	1.75
Direction of the thrust ref. To x axis :	33.00	32.00	33.00	33.00	33.00	32.00	28.10	27.10
Sliding								
Normal force on the base:	429.47	426.54	375.07	392.41	345.79	341.88	413.97	411.04
Point of application ref. To x axis :	2.91	2.96	2.89	2.47	2.42	2.47	3.15	3.20
Point of application ref. To y axis :	0.25	0.31	0.25	0.22	0.21	0.26	0.28	0.34
Shear force on the base	29.05	19.48	33.81	56.00	60.08	50.80	17.65	7.49
Resisting force on the base:	360.36	357.91	298.99	329.27	275.64	272.53	347.36	344.90
Sliding safety coefficient :	6.31	6.69	5.25	4.23	3.55	3.77	7.47	8.11
Overturning								
Overturning moment :	124.78	114.54	124.78	201.81	201.81	188.34	98.02	87.99
Restoring moment :	1374.94	1378.52	1207.35	1170.08	1038.09	1033.73	1400.37	1404.03
Overturning safety coefficient	11.02	12.04	9.68	5.80	5.14	5.49	14.29	15.96
Stresses acting on found.								
Eccentricity:	0.67	0.73	0.65	0.48	0.43	0.49	0.91	0.97
Normal stress on outer border	179.55	184.94	154.06	166.90	140.71	146.08	0.00	0.00
Max. stress on inner border :	1231.39	1239.20	1203.59	1013.21	980.49	991.79	1260.90	1271.24
General stability. Safety factor	67	60	57	58	56	56	50	51

Conclusions. Designing gabion walls, it is necessary to take into account the negative influence of the following factors:

- ✓ an increased gabion porosity leads to a decrease in the weight of gabion construction and can further increase the risk of overturning;
- ✓ the presence of geotextile at the base of the wall leads to a decrease in friction, which in turn leads to a worse adhesion of the structure to the base;
- ✓ the increase in the height of the structure and the decrease in the width of the base significantly increase the overturning moment and reduce the resistance against sliding.

The positive factors affecting the stability of the structure are an increase in the angle of inclination of the wall and displacement of gabions relative to each other (calculation options 7-8).

References

1. *What are gabion structures? "Liv-energo" Co., Ltd.* Online. LLC "LIV-ENERGO". 2019.07.22. URL: <https://www.liv-energo.com.ua/shho-take-gabionni-konstrukcii/>. (date of access: 31.10.2022).
2. Carbon dioxide emissions on the world map: who pollutes the planet the most? URL: <https://api.visicom.ua/uk/posts/co2>. (date of access: 31.10.2022).
3. *Recommendations for carrying out work, general provisions, temporary technical instructions for the use of gabions for strengthening the ground surface of railways were developed using the materials of CJSC "Gabions Maccaferri"*. Online. Gabions McCaffery. [b. d.]. URL: <https://refdb.ru/look/1931277-pall>. (date of access: 31.10.2022).
4. *PARFIENTYEVA I.O. and LUGOVSKA T.P. Modern technologies and methods of calculations in construction: a collection of scientific papers - Lutsk*. Lutsk NTU, 2017, No. 7, p. 188.
5. *Gabion fence: advantages, selection and installation - VBud*. Online. VBud. 2019-09-15. URL: <https://vbud.in.ua/parkan-z-gabioniv-perevagi-vibir-i-montazh/>. (date of access: 31.10.2022).
6. *TOMIŠA, A. Gabion walls - function, application, advantage | Geotech*. Online. Geotech. 2019-05-06. URL: <https://www.geotech.hr/en/gabion-walls/>. (date of access: 31.10.2022).
7. *SAVENKO V.YA., PETROVYCH VV, KASKIV VI, and KASKIV SV. Development of standards for construction gabions*. "Modern technologies and calculation methods in construction", 2017, No. 6, p. 205–212.
8. *INDIAN ROADS CONGRESS. IRC:SP:116-2018. Guidelines for design and installation of gabion structures*. Online. Kama Koti Marg, Sector-6, RK

- Puram, New Delhi-110 022, May 2018. URL: <https://www.scribd.com/document/449057904/IRC-SP-116-2018-Guidelines-for-Design-and-Installation-of-Gabion-Structures> (date of access: 31.10.2022).
9. *Do-it-yourself gabions - step-by-step instructions - Ekobil*. Online. Ekobil. 2021.11.08. URL: <http://ekobil.com.ua/gabioni-svoyimi-rukami-pokrokovaya-instruktsiya/>. (date of access: 31.10.2022).
 10. *GABION WALLS DESIGN modular gabion systems*. Online. A Division of CE Shepherd Company 2221 Canada Dry Street Houston TX 77023, [b. d.]. URL: <https://www.scribd.com/doc/38637356/MGS-Design-Guide-Gabion-Wall> (date of access: 31.10.2022).
 11. Korin` T., Manuel Teixeira Braz César, Rotko S.V. ON THE ISSUE OF CALCULATION AND CONSTRUCTION OF GABION RETAINING WALLS. Abstracts of the international practical internet conference of young scientists and students "Innovative processes in the field of road construction". Lutsk, 11/18/2022. URL: https://drive.google.com/file/d/1xce-qlOEOHuURqZOnjxZ_XgYXeNxLhzI/view

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ
ПРОТИЖЕЛЕДНИХ РЕАГЕНТІВ ПРИ ЗИМОВОМУ УТРИМАННІ
АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРИГ**

**INCREASING THE EFFECTIVENESS OF THE USE OF ANTI-ICING
REAGENTS DURING WINTER ROAD MAINTENANCE**

Седов А. В., к.т.н., доц. (Харківський національний автомобільно-дорожній університет), Фоменко О. О., асис. (Харківський національний автомобільно-дорожній університет)

Sedov A. V., Ph.D., assoc. (Kharkiv National Automobile and Road University), Fomenko O. O., assistant (Kharkiv National Automobile and Road University)

Проаналізовані фактори, що впливають на циклічність робіт і потребу ресурсів для зимового утримання автомобільних доріг. Виконана оцінка основних погодно-кліматичних факторів, що сприяють утворенню ожеледиці на поверхні покриття. В якості основного дорожнього фактору прийнята температура дорожнього покриття. Для визначення циклічності робіт із зимового утримання запропоновані рекомендації, які визначають кількість циклів робіт з розподілу протижеледних матеріалів і патрульного снігоочищення для різних видів зимової слизькості, які можуть утворюватися в зимовий період.

The experience of winter maintenance of roads abroad shows that compliance with the requirements of the standards is possible when choosing optimal work strategies and using not only technologies for eliminating winter slippage, but also technologies for preventing its occurrence. For this, the collection of weather and road information, its processing, forecasting of the condition of the road surface and decision-making on the choice of work technology should be carried out practically in real time. The article analyzes the factors affecting the cycle of work and the need for resources for winter road maintenance. The assessment of the main weather and climate factors that contribute to the formation of ice on the surface of the coating has been carried out. Weather and climate factors form the water-heat regime of the road structure, which cause fluctuations in humidity and temperature. Analysis of the simulation results shows that the probability of slippage is determined by the transition of air temperature not through 0 °C, but through minus 2°C and the presence of moisture on the coating. Thus, it is necessary to take the temperature of the road surface as the main road factor. To determine the cycle of winter maintenance work, recommendations are proposed that determine the number of cycles of work on the distribution of anti-icing materials and patrol snow removal for various types of winter slippery conditions that can form in the winter period. For each snowfall, the following are calculated: duration, average air temperature, surface temperature, amount of precipitation in millimeters of water

(according to weather station data), thickness of the snow layer on the road surface taking into account the snow density, intensity of snow accumulation on the surface.

Ключові слова: протиожеледні реагенти, зимове утримання, автомобільна дорога.

Keywords: anti-icing reagents, winter maintenance, road.

Утримання автомобільних доріг в зимовий період займає особливе місце і відрізняється значною складністю робіт, яка обумовлена впливом кліматичних факторів і різким, іноді раптовим зниженням експлуатаційних показників покриття при утворенні зимової слизькості на всій дорозі або на окремих її ділянках. Для забезпечення безпечного проїзду транспортних засобів та підтримки високих зчепних якостей дорожніх покриттів дорожньо-експлуатаційні організації проводять комплекс робіт із зимового утримання. На зимове утримання доріг виділяються значні фінансові ресурси, отже, періодичність робіт і необхідні для цього ресурси повинні обґрунтовуватися з урахуванням кліматичних особливостей району проходження дороги та її значення. Всі заходи по боротьбі із зимовою слизькістю, в залежності від їх цільової спрямованості, можна розділити на три групи [1]:

- зниження негативного впливу утворення зимової слизькості на умови руху транспортних засобів та підвищення коефіцієнта зчеплення колеса з дорогою шляхом розсипу по сніжно-льодяному шару фрикційних матеріалів;

- видалення з покриття крижаного або снігового шару з застосуванням механічних, теплових, хімічних, та інших методів;

- запобігання утворенню сніжно-льодяного шару або ослаблення його зчеплення з дорожнім покриттям шляхом профілактичної обробки протиожеледними матеріалами, або введення хімічних реагентів до складу покриття при його будівництві.

Досвід зимового утримання доріг в різних країнах світу показує, що дотримання вимог національних стандартів можливе за рахунок вибору оптимальних стратегій робіт, які засновані не тільки на використанні технологій ліквідації зимової слизькості, але і технологій попередження її виникнення. Для цього збір кліматичної і дорожньої інформації, її обробка, прогнозування стану покриття та прийняття рішень про вибір технології боротьби із зимовою слизькістю повинна виконуватися в режимі реального часу. Кліматичні умови характеризують рівень опадів, вологість повітря, добові зміни температури, напрямки і силу вітрів, тривалість і висоту снігового покриву і ще багато чого іншого (рис. 1) [1].

В якості фактору, який часто використовується для характеристики складності зимового періоду та розрахунку циклічності робіт з боротьби із

зимовою слизькістю, прийнята кількість переходів температури повітря через 0 °С.

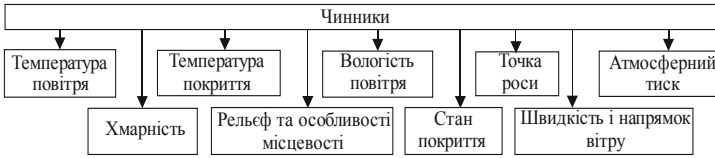


Рис. 1. Чинники, що визначають погодні явища, що впливають на енергоємність зимового утримання

У таблиці 1 представлена динаміка зміни температури поверхні покриття від температури повітря [2, 3].

Якщо температура покриття негативна, а лінії температур зближуються, то при їх перетині станеться утворення ожеледиці (рис. 2).

Таблиця 1

Динаміка зміни температур покриття при зміні температури повітря

Час виміру температур, година	Температура повітря, °С	Температура покриття, °С	Температура поверхні покриття зразків у лабораторному стенді, °С	Ймовірність утворення льоду на покритті, %
0	-14,0	-16,3	-14,0	86
1	-13,3	-16,1	-13,4	88
2	-11,8	-15,7	-12,5	88
3	-9,7	-15,2	-9,9	90
4	-7,0	-14,3	-7,5	95
5	-3,2	-13,7	-4,2	97
6	-3,0	-13,2	-3,6	97
7	-3,9	-13,2	-	-
8	-4,1	-13,4	-	-

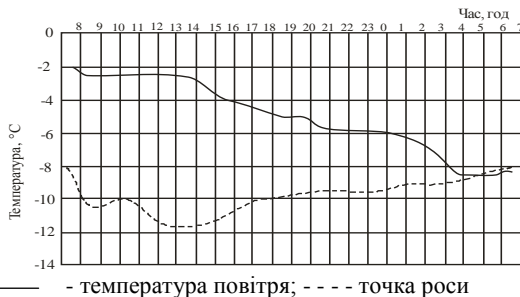


Рис. 2. Приклад графіка для прогнозу часу виникнення ожеледиці

Погодно-кліматичні фактори формують водно-тепловий режим дорожньої конструкції, що обумовлюють коливання вологості і температури [2].

У таблиці 2 представлена середня місячна і річна відносна вологість повітря на прикладі Сумської області.

Таблиця 2

Середня місячна і річна відносна вологість повітря

Час	Місяці						
	жовтень	листопад	грудень	січень	лютий	березень	квітень
7 ⁰⁰	88	90	89	88	87	89	80
13 ⁰⁰	62	78	84	82	77	72	55
21 ⁰⁰	79	86	88	87	86	85	71

У таблиці 3 наведено число днів з відносною вологістю на прикладі Сумської області.

Таблиця 3

Число днів з відносною вологістю

Вологість, %	Жовтень	Листопад	Грудень	Січень	Лютий	Березень	Квітень
≥ 80	7,1	16,8	21,7	19,2	12,9	11,8	4,6
≤ 30	1,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0

Однією з причин, що сприяють утворенню ожеледиці на поверхні покриття, є ослаблення швидкості вітру [4, 5]. У таблиці 4 наведена імовірність вітру різної швидкості.

Таблиця 4

Імовірність вітру різної швидкості

Місяці	0-1	2-5	6-10	11-15	Більше 15
Листопад	7,4	62,9	24,7	4,0	1,0
Грудень	5,7	62,8	26,0	4,4	1,1
Січень	5,0	55,6	31,0	6,8	1,6
Лютий	6,0	55,5	30,1	6,7	1,7
Березень	5,6	59,0	28,5	5,1	1,8

На рис. 3 представлена зміна в часі швидкостей вітру в попередній період та період ожеледиці.

Ослаблення вітру призводить до зменшення турбулентного обміну і сприяє радіаційному охолодженню мас повітря [2, 3, 6, 7].

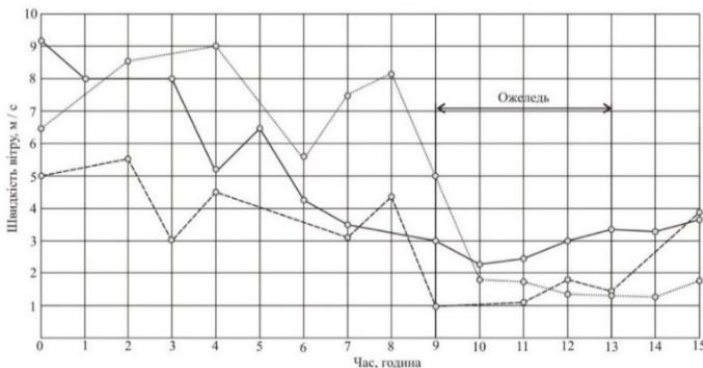


Рис. 3. Зміна в часі швидкості вітру

Унаслідок радіаційного охолодження дорожнього покриття нижче точки роси волога, яка знаходиться в повітрі, конденсується на ньому і перетворюється на тонкий шар льоду, який дуже важко виявити візуально, особливо під час руху автомобіля («чорний лід»). Після обробки, в наслідок взаємодії протиожеледних матеріалів з льодом температура льоду піднімається від мінус 10 °С на 13 °С і він спочатку перетворюється на воду, а потім на розчин солі. Після цього протягом 10-20 хвилин розчин остигає до вихідної температури мінус 10 °С, залишаючись у рідкому стані.

Кількість реагенту, що залишається на покритті, не йде в пори та за рахунок постійної адсорбції вологи з повітря підтримує певний концентрований розчин.

Для визначення циклічності робіт із зимового утримання запропоновані рекомендації, які визначають кількість циклів робіт з розподілу протиожеледних матеріалів і патрульного снігоочищення для різних видів зимової слизькості, які можуть утворюватися в зимовий період [1, 7]:

– для кожного випадку утворення зимової слизькості у вигляді склоподібного льоду (ожеледь, ожеледиця, твердий наліт, чорний лід) приймається один цикл розподілу протиожеледних матеріалів для ліквідації або профілактики утворення слизькості. Норми розподілу хімічних реагентів залежать від температури повітря або покриття (враховується її мінімальне значення). Блок-схема вибору виду ПОМ наведена на рис. 4;

– для розрахунку кількості циклів патрульного снігоочищення обробка даних про снігопади проводиться з урахуванням вимог до рівня утримання дороги. Снігопади, що слідуєть один за одним, об'єднуються в один, якщо час розриву між ними не перевищує директивного, відведеного на прибирання снігу для заданого рівня утримання.

Для кожного снігопаду розраховується: тривалість, середня температура повітря, кількість опадів в міліметрах води (за даними метеостанції), товщина шару снігу на дорожньому покритті з урахуванням щільності снігу, інтенсивність снігонакопичення на покритті.

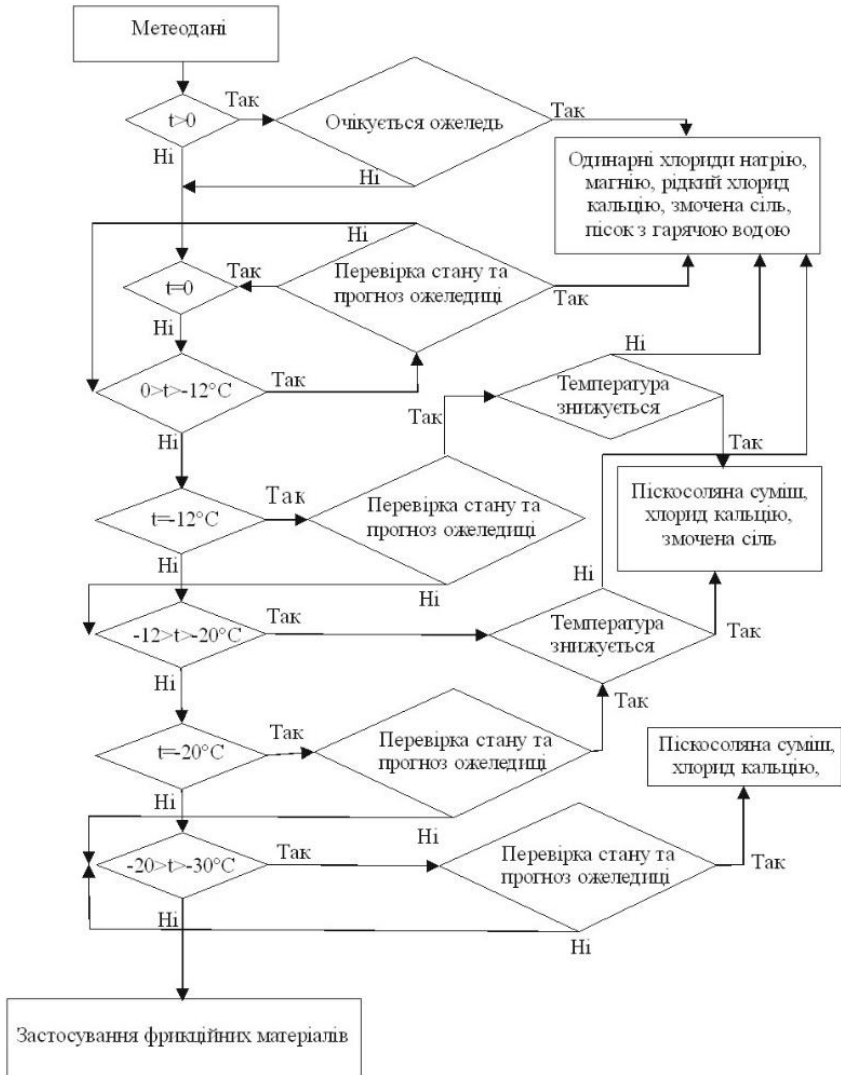


Рис. 4. Блок-схема вибору виду протиожеледних матеріалів

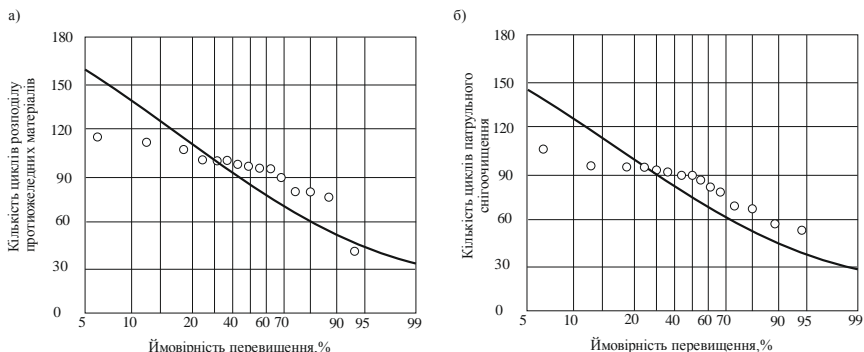
Для розрахунку циклічності вибираються снігопади, для яких кількість опадів перевищує допустиму товщину шару снігу на покритті, тобто потрібно хоча б один цикл патрульного снігоочищення;

– якщо можливо формування снігового накату, то приймаються 2 цикли розподілу протиожеледних матеріалів (на початку снігопаду – для профілактики ущільнення снігу і на заключному етапі очищення покриття);

– для снігопадів, які тривають більше доби, або з інтенсивністю більше 3 мм/год і при середній температурі повітря до мінус 8 °С передбачаються додатково 2 цикли обробки протиожеледними матеріалами;

– якщо на покритті можливий пухкий сніг, то розраховується інтенсивність снігонакопичення і кількість циклів патрульного снігоочищення з урахуванням вимог до рівня утримання. Для кожного снігопаду додатково враховується один цикл на прибирання снігу після його закінчення.

За результатами моделювання доведено, що ймовірність утворення слизькості визначається переходом температури повітря не через 0 °С, а через мінус 2 °С і наявністю вологи на покритті. Отже, цей параметр не придатний для розрахунків циклічності робіт із зимового утримання [1, 8-10]. Таким чином, температура дорожнього покриття є основним дорожнім параметром, що впливає на утворення слизькості на дорожньому покритті і визначальним для планування робіт з боротьби із зимовою слизькістю. Криві розподілу кількості циклів наведені на рис. 5.



а – для обробки проїзної частини протиожеледними матеріалами, б – для патрульного снігоочищення

Рис. 5. Криві розподілу кількості циклів

References

1. Baklanov Yu. V. Sovershenstvovanye orhanyzatsyyi zymneho soderzhaniya avtomobylnykh dorozh na osnove rascheta tsyklychnosti rabot:

URL: <https://www.dissercat.com/content/sovershenstvovanie-organizatsii-zimnego-soderzhaniya-avtomobilnykh-dorog-na-osnove-rascheta-> (data zvernennia: 15.11.2022).

2. Zamorskiy A. D. Atmosfernyi led: ynei, hololed y hrad / Zamorskiy A. D. M.: Hydrometeoizdat, 1955. 450 s.

3. Veselov E. P. Meteorologicheskoye usloviya obrazovaniya y prohnolz hololedytsy: metod. pismo / Veselov E. P., Rudakov L. M. M.: Hydrometeoizdat, 1971. 16 s.

4. Skorobohatchenko D. A. Metodologicheskoye osnovy upravleniya ekspluatatsionnyim sostoianiem avtomobilynykh doroh po kachestvennym parametram, zadavaemym verbalno / VolhHASU, 2011. 219 s.

5. Sakuta N. B., Kodentseva Yu. V., Hainulyna Y. N.. Formyrovanye kontseptualnoi modely orhanyzatsyy rabot po borbe s zymnei skolzkostiu na avtomobilynykh dorohakh // Vestnyk SybADY. 2016. №3 (49). S.80-86.

6. Samodurova T. V. Meteorologicheskoye obespechenye zymneho soderzhaniya avtomobilynykh doroh. TYMR, 2003. 183 s.

7. Samodurova T. V., Baklanov Yu. V. Metodyka rascheta tsyklychnosty vypolneniya rabot po zymnemu soderzhaniyu avtomobilynykh doroh // Dorohy y mosty. 2013. № 2. S. 99-112.

8. Samodurova T. V., Baklanov Yu. V. Tsyklychnost rabot po zymnemu soderzhaniyu avtomobilynykh doroh // Nauchnyi zhurnal stroytelstva y arkhytektury. № 1(33). 2014. S. 72-82.

9. Bobrova T. V., Sleptsov Y. V. Optymyzatsiya struktury parka mashyn dlia zymneho soderzhaniya horodskykh ulyts y doroh s uchetom veroiatnostnoi otsenky klymatycheskykh faktorov // Vestnyk SybADY. 2015 № (3(43)). S. 32-38.

10. Leonovych Y. Y. Prohnolyrovanye zymnei skolzkosty avtomobilynykh doroh // Vestnyk Belorusskoho natsyonalnogo tekhnicheskoho unyversyteta: nauchno-tekhnicheskyy zhurnal. 2007. № 1. S. 50-55.

Список використаної літератури

1. Бакланов Ю. В. Совершенствование организации зимнего содержания автомобильных дорог на основе расчета цикличности работ: URL: <https://www.dissercat.com/content/sovershenstvovanie-organizatsii-zimnego-soderzhaniya-avtomobilnykh-dorog-na-osnove-rascheta-> (дата звернення: 15.11.2022).

2. Заморский А. Д. Атмосферный лед: иней, гололед и град / Заморский А. Д. М.: Гидрометеиздат, 1955. 450 с.
3. Веселов Е. П. Метеорологические условия образования и прогноз гололедицы: метод. письмо / Веселов Е. П., Рудаков Л. М. М.: Гидрометеиздат, 1971. 16 с.
4. Скоробогатченко Д. А. Методологические основы управления эксплуатационным состоянием автомобильных дорог по качественным параметрам, задаваемым вербально / ВолгГАСУ, 2011. 219 с.
5. Сакута Н. Б., Коденцева Ю. В., Гайнулина И. Н.. Формирование концептуальной модели организации работ по борьбе с зимней скользкостью на автомобильных дорогах // Вестник СибАДИ. 2016. №3 (49). С.80-86.
6. Самодурова Т. В. Метеорологическое обеспечение зимнего содержания автомобильных дорог. ТИМР, 2003. 183 с.
7. Самодурова Т. В., Бакланов Ю. В. Методика расчета цикличности выполнения работ по зимнему содержанию автомобильных дорог // Дороги и мосты. 2013. № 2. С. 99-112.
8. Самодурова Т. В., Бакланов Ю. В. Цикличность работ по зимнему содержанию автомобильных дорог // Научный журнал строительства и архитектуры. № 1(33). 2014. С. 72-82.
9. Боброва Т. В., Слепцов И. В. Оптимизация структуры парка машин для зимнего содержания городских улиц и дорог с учетом вероятностной оценки климатических факторов // Вестник СибАДИ. 2015 № 3(43). С. 32-38.
10. Леонович И. И. Прогнозирование зимней скользкости автомобильных дорог // Вестник Белорусского национального технического университета: научно-технический журнал. 2007. № 1. С. 50-55.

**РЕКОНСТРУКЦІЯ ІНЖЕНЕРНИХ СПОРУД ТА МЕРЕЖ,
ЛАНДШАФТУ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ЛАЗЕРНОГО
СКАНУВАННЯ**

**RECONSTRUCTION OF ENGINEERING STRUCTURES AND
ENGINEERING NETWORKS, LANDSCAPE BASED ON LASER
SCANNING TECHNOLOGY**

Сунак П. О., к.т.н., доц., Синій С. В., к.т.н., доц., Мельник Ю. А., к.т.н., доц. (Луцький національний технічний університет, Луцьк), Ксьоншкевич Л. М., к.т.н., доц., Крантовська О. М., к.т.н., доц. (Одеська державна академія будівництва та архітектури, Одеса), Орешкович Матія, к.т.н., доц. (Північний університет, Вараздін, Хорватія)

Sunak P. O., Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Synii S. V., Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Melnyk Yu. A., Ph.D. in Engineering, Associate Professor (Lutsk National Technical University, Lutsk), Ksonshkevych L. M., Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Krantovska O. M., Ph.D. in Engineering, Associate Professor (Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa), Orešković Matija, Ph.D. in Engineering, Associate Professor (University North, Varazdin, Croatia)

У даній статті обґрунтовано перспективність застосування технології лазерного сканування при проведенні робіт з реконструкції інженерних споруд та мереж, ландшафту. Ця технологія дає можливість отримати високоточні обміри складних інженерних об'єктів, відновити проєктну документацію та створити тримірну модель з достатньою деталізацією для подальшої обробки в різних програмних комплексах. Активне впровадження технології лазерного сканування у будівництві відповідає концепції "Індустрії 4.0" та забезпечує сучасний технічний рівень вирішення широкого кола завдань сталого розвитку міст та ОТГ в умовах урбанізації територій.

The relevance of reconstruction of urban infrastructure has increased when solving modern tasks of sustainable development of cities and united territorial communities in the conditions of urbanization of territories, including engineering structures, engineering networks, and landscape objects. The active introduction of laser scanning technology in construction corresponds to the concept of "Industry 4.0" and provides a modern technical level of solving a wide range of tasks in the construction field.

During laser scanning, data is transmitted about the dimensions, orientation in space, the location of the supporting structures of the object, etc. With the help of this method, high accuracy of measurements is ensured and significantly saves time for

object research. This technology makes it possible to obtain high-precision measurements of complex engineering objects, restore design documentation, create a 3D model of the object with sufficient detail for further processing in various software packages. Therefore, the article analyzes the directions of using laser scanning technology for the reconstruction of engineering structures, engineering and transport networks, the landscape of urban areas and wilderness areas.

The main areas of use of laser scanning technology for scientific research in construction are analyzed. The possibilities of this technology to integrate the data of 3D models obtained by laser scanning in BIM with other application programs are emphasized. In particular, such integration can be applied to the research of: elements of building structures; pipelines and their working environments; engineering networks, landscape in accounting and informational, billing, GIS software products for municipal institutions, enterprises; characteristics of energy efficiency of buildings and facilities, engineering networks. The development of such integration is constantly expanding.

Laser scanning technologies facilitate the task of developing a landscape project during the reconstruction of the territory with changes: in its development; planning solutions for transport and pedestrian routes, engineering structures and networks, landscaping and greening; designing objects of landscape architecture in the conditions of the existing restrictions of the territory from the side of buildings, relief and other factors of the territory of the urban environment.

Ключові слова: реконструкція, інженерні споруди, інженерні мережі, транспортні мережі, ландшафтна архітектура, технологія лазерного сканування, тривимірна модель об'єкта, урбаністичний аналіз.

Keywords: reconstruction, engineering structures, engineering networks, transport networks, landscape architecture, laser scanning technology, three-dimensional object model, urban analysis.

Постановка проблеми. За останнє десятиліття значно зросла актуальність потреби широкого впровадження у будівництво концепції "Індустрії 4.0" [1]. Це також стосується і реконструкції та відбудови об'єктів міської забудови та інфраструктури, у тому числі – інженерних споруд та мереж. Особливо важливого змісту такі завдання набувають у военний час, для якого характерні значні руйнування великої кількості об'єктів, як це ми бачимо на території України під час теперішньої повномасштабної війни, розв'язаної Росією.

При реконструкції та реставрації об'єктів окрім визначення основних геометричних характеристик потрібна інформація про наявність різних видів деформацій елементів будівельних конструкцій (крени, прогини, тріщини, зсуви тощо), а також – про наявність зовнішніх дефектів, які виникли під час експлуатації досліджуваних об'єктів.

Реконструкція пам'яток архітектури потребує вирішення завдань щодо збереження історичного зовнішнього вигляду об'єкта в цілому та його елементів.

Модернізація та реконструкція об'єктів житлового фонду, лінійних об'єктів інженерно-транспортної інфраструктури (транспортних та інженерних мереж тощо) вимагає визначення точних обмірних розмірів для розробки проектних рішень із відновлення їх експлуатаційної придатності.

Досить часто виникає проблема у відсутності первинної проектної документації об'єкта реконструкції або вона не відповідає дійсності.

Вирішити усі ці завдання допомагає технологія лазерного сканування. Вона дає можливість за досить короткий час з мінімальними затратами отримати тривимірну модель об'єкта з достатньою деталізацією для подальшої обробки в різних програмних комплексах.

Аналіз відомих досліджень і публікацій. Активний інтерес дослідників до теоретичних та практичних питань впровадження лазерних технологій як потужного безконтактного інструменту вимірювання у технічних дослідженнях припадає на 60-ті роки минулого століття і в наш час лише посилюється, завдяки активному розвитку промислового виробництва лазерів, що зумовило можливості здешевлення та доступності, пристосування таких технологій для потреб більшого кола споживачів у різних галузях економіки [2-7 та ін.]. Тому розвиток технологій вимірювань із застосуванням лазера на сьогодні характеризується великою різноманітністю методів, пристосованих до специфічних технічних завдань досліджень.

Завдяки досить високій точності та швидкості вимірювань у поєднанні з теоретичними методами обробки хмар даних та об'ємної (3D) візуалізації їх результатів, застосування лазера дозволяє проводити широкий спектр вимірювань, серед яких:

- створення фізичної або віртуальної тривимірної моделі об'єкта;
- дослідження геометричних параметрів об'єктів (від детальних поверхонь дрібних елементів конструкцій будівель, інженерних споруд, інженерних мереж до великих площ територій планування ландшафту, забудови, лінійних об'єктів інженерно-транспортної інфраструктури з виконанням масштабних геодезичних зйомок супутникової навігації);
- дослідження динамічних характеристик потоку рідин та газів;
- дослідження міцнісних, гідравлічних та інших характеристик матеріалів, конструкцій (у гібридних методах із застосуванням лазерних вимірювань) [2-13 та ін.].

Використання технологій лазерного сканування для вирішення будівельних завдань сталою розвинутою темою є актуальною темою як в Україні так і в усьому світі. Це підтверджується і тим, що за даною тематикою постійно зростає кількість публікацій теоретичних досліджень, зокрема у наукометричних базах даних [2, 13 та ін.], а одночасно з ними – публікацій практичного характеру щодо використання інструментів лазерного сканування об'єктів (наземного та за допомогою різних типів

БПЛА) у різних сферах будівництва. Зокрема, швидко збільшується об'єм відповідних наукових та науково-популярних публікацій на інтернет-порталах, присвячених практичним аспектам виконання робіт з лазерного сканування [3-7 та ін.].

Світовий досвід застосування технології лазерного сканування показує, що популярність досліджень в цій галузі зростає з кожним роком. Безліч об'єктів культурної спадщини, серед загальновідомих - Тадж-Махал (Індія), Масада (Ізраїль), собор Нотр-Дам-де-Парі (Франція), собор Санта-Марія-дель-Фьоре (Італія), були обстежені за допомогою лазерного сканування. Багато проєктів за допомогою даної технології реалізовано і в Україні, а саме: сканування Києво-Печерської лаври, старовинної будівлі готелю «Лейпциг», ділянки кільцевої траси М-01, Олександрівської ГЕС, гідротехнічної споруди – гідроагрегату №2 ДніпроГЕС-1, об'єктів культурної та історичної спадщини та багато інших [4-7 та ін.].

Аналіз публікацій про розвиток сучасних технологій на вітчизняному та закордонному будівельному ринку свідчить, що внаслідок технічного прогресу вартість обладнання та робіт з лазерного 3D-сканування у галузі будівництва, як і в інших галузях економіки, знижується, а сфера його застосування – розширюється. Зважаючи на це, у статті розглянуто перспективні напрямки використання технологій лазерного сканування для потреб реконструкції об'єктів у будівництві.

Мета статті – визначення напрямків застосування технології лазерного сканування при реконструкції об'єктів інженерних споруд та мереж, ландшафту.

Основні завдання: Основним завданням статті є дослідження можливостей технологій лазерного сканування, з аналізом доцільності використання їх результатів для вирішення питань реконструкції об'єктів інженерних споруд та мереж, ландшафту.

Виклад основного матеріалу. Розвиток технології лазерного сканування у галузі будівництва здійснюється на основі технічних засобів для 3D вимірювань, функціонування яких сумісне з розрахунково-інформаційним програмним забезпеченням комп'ютерних мереж, інформаційних технологій та відповідає завданням впровадження концепції "Індустрії 4.0".

Лазерне сканування у будівництві добре замінює більшість інструментів, які використовують для обмірів, але ще є дорожчим за традиційні методи. Тому на сьогодні його переважно застосовують у ситуаціях, коли потрібна висока точність вимірювань або об'єкт є дуже великим, має складні архітектурні форми або небезпечні умови для вимірювань традиційними методами. Виходячи з цього, технологія лазерного сканування об'єктів у будівництві стає все більш доступною та поширеною і в найближчі роки її застосування стане звичним завданням навіть для невеликих проєктів та об'єктів. Це відповідає напрямкам

революційних змін у розвитку цифрового будівництва у світі, які також характерні і для будівельної галузі України.

Поєднання геодезичних та фотограмметричних приладів дозволило значно спростити більшість геодезичних та обмірних робіт і створити систему тривимірного сканування, втілену у лазерному сканері, і тому таке застосування лазерів у будівництві є одним з найпоширеніших [4-7, 9-13].

Основою роботи лазерного сканера є генерування лазерного променя, який спочатку відбивається від дзеркала, що обертається в двох площинах, а потім від усіх поверхонь на які попадає, відбивається, зчитується сканувальною системою. Вона призначена для моделювання геометричних характеристик вимірюваних об'єктів (форми, розмірів, розташування в просторі). Усі дані записуються в базу приладу. Вимірювання об'єкта інколи здійснюються з однієї точки, але частіше – з багатьох станцій сканування, вибір їх кількості залежить від масштабів сканованого об'єкта.

Отже, метод тривимірного сканування базується на швидких вимірюваннях відстаней від сканера до точок об'єкта з одночасним фіксуванням вертикальних та горизонтальних кутів. Вимірювання виконуються з дуже великою швидкістю – сотні тисяч вимірювань за секунду. Результатом такого сканування будівельного стану об'єкта є хмара точок зі щільних 3D вимірів у тривимірних координатах X, Y, Z, дані якої пройшли попередню обробку з реєстрації та редагування за допомогою програмного забезпечення лазерного сканера, як на прикладі на рис. 1,а. За результатами сканування можна мати зображення об'єктів в чорно-білому варіанті або з цифровою фотофіксацією кольорів (RGB характеристик).

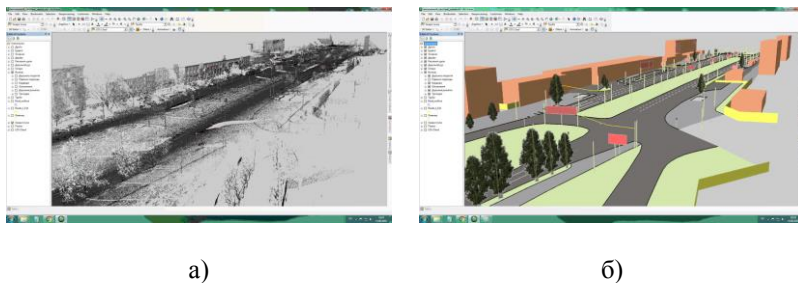


Рис. 1. Хмара точок 3D вимірів (а) та 3D модель зображення у BIM (б) після її обробки

З оброблених на основі моделі CAD (Revit, AutoCAD, ReCap, ArchiCAD та ін.) хмар точок отримуються інформаційні моделі будівель (BIM). Причому процес створення тривимірної моделі об'єкта у BIM

можна здійснювати вручну або з використанням програмного забезпечення на основі методів автоматизації, фотограмметрії та іншої математичної обробки даних сканованих зображень [10-13 та ін.], дослідження з розробки та удосконалення таких методів не припиняються що також підтверджує перспективність застосування технології лазерного сканування у будівництві зокрема. Отже, за допомогою сучасних програмних комплексів можна обробляти хмари сканованих точок та отримувати тривимірні фотореалістичні зображення (рис. 1,б).

Для вихідних даних до реконструкції будь-якого об'єкта бажаним є отримання об'ємної інформації в цифровому вигляді. При лазерному скануванні відбувається передача даних про габарити, орієнтацію в просторі, розташування несучих конструкцій об'єкта тощо. Завдяки цьому методу забезпечується висока точність вимірів та суттєво економиться час на дослідження об'єкта.

Переваги лазерних сканерів в обмірних роботах можна використати при реставрації пам'яток архітектури та реконструкції історичних будівель. В Україні цей напрямок застосування технології лазерного сканування є одним з найбільш поширених. Цифрова технологія дозволяє зробити високоточні обміри важкодоступних архітектурних елементів. Завдяки цьому значно скорочуються терміни виконання обмірів. Архітектурний обмір за даними лазерного сканера містить плани, фасади, розрізи, окремі деталі, при цьому достовірність цієї інформації за рахунок високої автоматизації та точності значно вища, ніж при використанні традиційних приладів.

Лазерне сканування в промисловості є актуальним і одним з перспективних напрямків, адже його можна успішно використати як метод досліджень для проведення реконструкції великої кількості існуючих будівель, споруд та інженерних мереж, технічні рішення яких є складні та небезпечні при застосуванні традиційних методів обстежень. Велике значення при реконструкції насичених технологічними мережами та устаткуванням промислових цехів має просторова інформація про технологічне обладнання та будівельні конструкції. Хмара точок та растрова тривимірна модель, отримані за допомогою лазерного сканера дозволяють не лише правильно запроєктувати реконструкцію, але й істотно знизити витрати на усунення недоліків при виконанні будівельно-монтажних робіт.

Аналогічні питання можна успішно вирішувати при реконструкції громадських та житлових будівель (наприклад, технологічних приміщень плавальних басейнів, ІТП, технічних поверхів).

Технологія вимірювань та 3D моделювання параметрів потоку рідини за допомогою лазера десятиліттями використовується у різноманітних дослідженнях з технічної механіки рідини та газів [2, 8 та ін.], а отже пристосована для досліджень з 3D моделюванням аналогічних процесів

для потреб проектування реконструкції конструкцій інженерних споруд та систем для інженерних мереж, які взаємодіють з рідинами та газами. Наприклад, проектування: інженерних споруд, стійких до різноманітних зовнішніх впливів природного та техногенного походження (вітру; дощу, зливи, граду, снігопаду та хуртовини; паводків, цунамі та інших екстремальних погодних явищ; вибухів тощо); конфігурації та геометричних параметрів (розмірів, шорсткості стінок тощо) каналів, лотків, трубо- та повітропроводів, резервуарів споруд та обладнання інженерних мереж для оптимізації гідравлічних режимів руху рідини чи газу. При цьому технології лазерного сканування можуть застосовуватись для вимірювань та 3D моделювання як потоків рідин та газів, так і взаємодіючих з ними поверхонь елементів конструкцій інженерних споруд та систем. І завдяки перевагам цих технологій суттєво зменшується час від початку дослідних вимірювань до прийняття проектного рішення реконструкції об'єкту, що особливо помітно для об'єктів складних (наприклад, споруди та інженерні мережі міської насосної станції I підйому), масштабних (наприклад, споруди ГЕС), небезпечних (наприклад, споруди АЕС, каналізаційних мереж; інженерні споруди та мережі в аварійному стані).

Аналогічні переваги від застосування технології лазерного сканування і при реконструкції транспортних споруд (наприклад, для обстеження опор мостів через водні перешкоди) та мереж (наприклад, для дослідження параметрів транспортних потоків).

Також, в умовах реконструкції територій земель рекреаційного призначення, існуючий ландшафт, озеленення яких потрібно максимально зберегти (наприклад, територій природного парку [14 та ін.], зоопарку [15 та ін.], міських рекреаційних зон тощо), технології лазерного сканування допомагають не лише провести детальний інженерно-геодезичний моніторинг та проектування території, споруд та мереж, зелених насаджень, об'єктів ландшафтної архітектури та благоустрою тощо, але і так само детально і практично безперервно слідкувати за дотриманням законодавчих та нормативних вимог до виконання будівельних робіт [16 та ін.], а завдяки можливостям цифровізації даних – і мінімізувати будівельне втручання у ландшафт в майбутньому. Звичайно, при цьому зростає вартість будівельних робіт, що слід враховувати при всебічному обґрунтуванні рішень з реконструкції об'єкта, наприклад використовуючи принципи SWOT-аналізу для оцінки будівельних, екологічних, економічних чинників [15 та ін.].

Аналогічні вигоди від впровадження технології лазерного сканування матиме муніципальна влада населених пунктів і ОТГ при прийнятті рішень щодо обґрунтування, проектування, інспектування робіт з реконструкції територій та питань урбаністичного аналізу населених пунктів.

Перспективним є застосування технології лазерного сканування як потужного інструменту для дослідження безконтактним методом технічного стану трубопроводів інженерних мереж. Причому, сучасні технічні розробки дозволяють проводити інспекцію зовнішніх поверхонь трубопроводів та, що технічно складніше, – внутрішніх поверхонь, які безпосередньо взаємодіють з транспортованими трубопроводами робочими середовищами. При цьому, за допомогою вимірювань лазерним сканером можна досліджувати не лише зміни геометрії внутрішнього трубопроводу (овальність, вирівнювання, зміни діаметру трубопроводу від заростання чи засмічування, місця з'єднань трубопроводів, фітингів, арматури, кути повороту, нахилу трубопроводу тощо) чи рівня рідини у ньому, пропускної здатності трубопроводу, але й різні дефекти внутрішніх поверхонь трубопроводу, зокрема розміри ерозії чи корозії, тріщин, що дозволяє вчасно запроєктувати заходи з ремонту, експлуатації, а при потребі – й реконструкції ділянок трубопроводів інженерних мереж.

Зокрема, для робіт з профілометрування трубопроводів та інспекції колодязів інженерних мереж використовується лазерний профайлер (профілометр), який дозволяє визначити безконтактним методом зміни у вертикальній та горизонтальній формі трубопроводів з різних матеріалів із внутрішнім діаметром від 6 дюймів [17, 18 та ін.]. Технологія із застосуванням лазерного профайлера (рис. 2,а) використовує кільце світла, яке генерує лазер на внутрішню поверхню трубопроводу, наприклад систем побутової та дощової каналізації [18]. Закріплена на сканері камера виявляє кільце світла і зберігає лазерне зображення у вигляді зручної для досліджень інтерактивної 3D моделі трубопроводу (рис. 2,б) з можливістю переміщатися по ній.

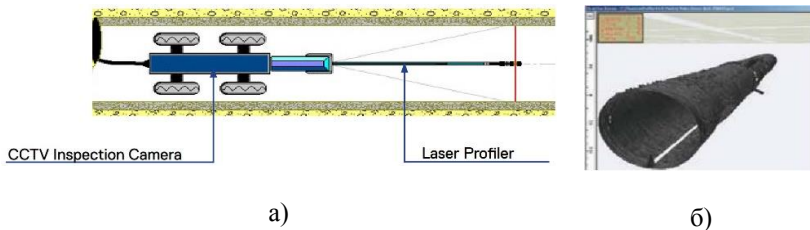


Рис. 2. Схема внутрішнього інспектування трубопроводу за допомогою лазерного профайлера а) та 3D модель трубопроводу у BIM (б) після обробки хмари точок

Причому, адаптоване програмне забезпечення [19] розроблене з можливістю об'єднувати оцифровані дані інспектування трубопроводів та

колодязів з їх ГІС-даними, що дозволяє картографувати систему каналізації вбудованою в середовище міської інфраструктури (рельєфу ландшафту, будівель та споруд, інженерних та транспортних мереж, споруд благоустрою та ландшафтної архітектури, об'єктів озеленення тощо) та завдяки такій двонаправленій інтеграції здійснювати обмін інформацією про її ділянки в режимі реального часу. Подальший аналіз отриманих даних дає можливість прийняти рішення щодо необхідності реконструкції або ремонту каналізаційної мережі. Аналогічно даний метод інспекції трубопроводів може також бути використаний для удосконалення процесу прогнозування надійності роботи трубопроводів систем інших інженерних мереж (водо-, тепло-, газопостачання тощо).

У більшості пристроїв технології лазерного сканування у будівельній галузі лазер фіксує будь-які незначні зміни в геометрії поверхонь з міліметровою точністю. Тому при реконструкції він зокрема може застосовуватись у методах візуального моніторингу стану елементів конструкцій будівель та споруд [20, 21 та ін.]. Також, лазерне сканування можна використовувати для відповідної точності експериментальних досліджень міцнісних характеристик елементів будівельних конструкцій, наприклад для уточнення та удосконалення методик їх розрахунку [22, 23 та ін.] із перевіркою збіжності теоретичних результатів з експериментальними. Особливо цікавою є можливість порівняння 3D моделей, отриманих теоретично чисельними методами [22, 23 та ін.] із 3D моделями відтворення у ВІМ лазерного сканування результатів експериментів (або лазерного сканування у складі гібридного методу досліджень – з використанням і інших методів визначення експериментальних показників та характеристик). Перспективним дослідженням є розробка теоретичного методу двонаправленої взаємодії та інтеграції цих 3D моделей, коли вони одна одну корегують в напрямку отримання заданої збіжності результатів, що дозволить оптимізувати методику інженерного розрахунку таких 3D змодельованих елементів будівельних конструкцій.

Одним із важливих напрямків реконструкції будівель та споруд, інженерних мереж є роботи з підвищення їх енергоефективності шляхом модернізації, реновації об'єктів. При цьому для великих та архітектурно, геометрично складних будівель та споруд досить технічно складним завданням є отримання 3D чи принаймні 2D моделі елементів зовнішньої оболонки об'єкта (фасадів, даху і покрівлі, підвалів тощо) та оболонки внутрішніх просторів складної геометрії. Аналогічні проблеми стосуються моделювання геометрично складних комбінацій інженерних мереж. У Точність відтворення геометричних моделей таких об'єктів може суттєво впливати на адекватність результатів розрахунку їх показників енергоефективності згідно нормативних методик [24, 25]. У цьому випадку впровадження технології лазерного сканування у методику розрахунку

енергоефективності об'єкту дозволяє не лише отримати його оцифровану 3D модель у BIM для розрахунків геометричних показників високої точності, але й проводити інтеграцію цієї моделі з результатами інфрачервоної термографії об'єкта (наприклад, за методологією [25]), проведеними до та після реконструкції для контролю результатів на кожному з її етапів – від отримання вихідних даних до енергоаудиту виконаних будівельних робіт.

Завдяки можливості сканування з великої відстані, технологію лазерного сканування можна дуже широко застосовувати в сфері дорожнього будівництва. Складність при зйомці транспортно-пішохідних шляхів (вулиць, доріг, вело- та пішохідних доріжок тощо) традиційними методами, особливо в міських умовах з великою кількістю учасників та інтенсивністю їх руху, – це необхідність зупинки руху автотранспорту та інших учасників руху. Зйомка методом лазерного сканування дозволяє уникнути цієї негативної специфіки. Так, для проектування реконструкції доріг та дорожньо-транспортних споруд, таких як мости та шляхопроводи, доцільно використати цю технологію для створення топографічних планів та профілів. Також, при використанні такої технології можна дуже швидко виявити та виміряти усі дефекти дорожнього покриття.

Аналогічно застосовуючи технологію лазерного сканування можна вирішувати будівельні завдання (на етапах проектних, будівельних робіт) і для потреб реконструкції інженерних мереж, благоустрою та озеленення територій. Це особливо актуально для міських умов, для яких характерна висока складність інфраструктури та урбанізованого ландшафту. Наприклад, для коригування базових параметрів генпланів міст високоурбанізованих територій Луганської та Донецької областей України [26], технологія лазерного сканування буде ефективним інструментом вирішення питань на рівні міських агломерацій.

Також, технології лазерного сканування полегшують завдання розробки проекту ландшафту при реконструкції території зі змінами: у її забудові; планувальних рішеннях транспортно-пішохідних шляхів, інженерних споруд та мереж, благоустрою та озеленення; проектуванні об'єктів ландшафтної архітектури в умовах існуючих обмежень території з боку забудови, рельєфу та інших чинників території міського середовища.

Висновки. Отже, технології лазерного сканування, які на сьогодні технічно та технологічно стрімко розвиваються, сприяють революційному розвитку цифровізації галузі будівництва і мають високий потенціал у забезпеченні нових можливостей для ефективного вирішення питань та оптимізації процесів при реконструкції інженерних споруд та мереж, ландшафту. За допомогою лазерного 3D сканування можна:

- в короткий термін (а отже зі значно підвищеною продуктивністю робіт) проводити високоточні детальні обміри складних інженерних об'єктів та отримати тривимірну модель з фотореалістичним зображенням;

- відновити/оновити проєктну документацію, необхідну для проведення робіт з реконструкції, ремонту та експлуатації об'єкта;
- проводити спостереження за просторовими деформаціями конструкцій будівель та споруд, трубопроводів та інших елементів конструкцій інженерних мереж шляхом порівняння з раніше проведеними вимірами (довгостроковий моніторинг об'єктів);
- виявляти зовнішні дефекти, оцінювати їх масштаби при польових та лабораторних дослідженнях залізобетонних конструкцій (сколи, нерівності, раковини, відшарування захисного шару арматури тощо) та інших елементів будівель і споруд, обладнання та трубопроводів інженерних мереж;
- інтегрувати дані 3D моделей у BIM з іншими прикладними програмами для досліджень: елементів будівельних конструкцій; трубопроводів та їх робочих середовищ; інженерних мереж, будівель та споруд, ландшафту в розрахунково-інформаційних, білінгових, ГІС програмних продуктах для муніципальних установ, підприємств; характеристик енергоефективності будівель та споруд, інженерних мереж;
- підвищити ефективність гібридної оцінки технічного стану (коли технологія лазерного 3D сканування поєднується з іншими технологіями досліджень) зовнішніх та внутрішніх поверхонь трубопроводів при інспекції інженерних мереж з метою виявлення і аналізу дефектів та пошкоджень;
- отримати топографічні плани існуючого стану місцевості та ідентифікувати процес проєктування при реконструкції лінійних об'єктів інженерно-транспортної інфраструктури (транспортних та інженерних мереж тощо), в тому числі:
 - отримати цифрову модель рельєфу та дорожнього покриття, трасування трубопроводів інженерних мереж;
 - реконструювати або розробити нові поперечні та поздовжні профілі дороги, інженерних мереж;
 - проводити топозйомку лінійних об'єктів, місцевості (мости, дороги, тунелі, залізниці, споруди інженерних мереж тощо);
 - контролювати якість виконання робіт з реконструкції одного чи одночасно комплексу з багатьох лінійних об'єктів інженерно-транспортної інфраструктури (транспортних та інженерних мереж тощо), в тому числі – шляхом порівняння результатів сканування з проєктною документацією;
 - відстежувати зміни у зовнішньому вигляді вулиць (моніторинг благоустрою та озеленення, незаконного будівництва тощо);
 - контролювати стан зелених насаджень (міських рекреаційних зон, національних природних парків тощо);
 - оптимізувати маршрутні польові дослідження територій озеленення (розбивка, облаштування алей, доріжок, садових лавочок; реконструкція

насаджень; проектування посадки нових дерев і кущів; обґрунтування очищення території від захаращеності, обсягів земляних робіт тощо);
- оптимізувати проєктні, будівельні роботи з благоустрою територій.

References

1. Hermann M., Pentek T., Otto B. Design principles for industrie 4.0 scenarios. *49th Hawaii international conference on system sciences (HICSS)*. 2016. pp. 3928-3937. URL: <https://doi.org/10.1109/HICSS.2016.488>
2. Wu C., Yuan Y., Tang Y., Tian B. Application of Terrestrial Laser Scanning (TLS) in the Architecture, Engineering and Construction (AEC) Industry. *Sensors*. 2022. No 22(1). pp. 265. URL: <https://doi.org/10.3390/s22010265>
3. Hexagon AB. URL: <https://hexagon.com/>
4. Leica Geosystems AG. URL: <https://leica-geosystems.com/en-us/>
5. PromScan3D. URL: <https://www.promscan3d.com/>
6. AERO3D engineering. URL: <https://aero3d.ua>
7. Мірничий - геодезично-геологічна група. URL: <https://mirnychyj.com.ua/>
8. Xi W., Lu W. G. Formation mechanism of an adherent vortex in the side pump sump of a pumping station. *International Journal of Simulation Modelling*. 2021. Vol. 20. Is. 2. pp. 327-338. URL: <https://doi.org/10.2507/IJSIMM20-2-562>
9. Uhl A. V., Melnyk, O. V., Rudyk O. V., Melnyk Yu. A., Synii S. V. Principles of modeling dynamic systems for geodetic monitoring of structures. *Modern technologies and methods of calculations in construction*. 2021. Vol. 15. pp. 85-92. URL: [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2021-5\(15\)-12](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2021-5(15)-12)
10. Melnyk V. M., Shostak A. V. *Kilkisna stereomikrofraktohrafiia: monohrafiia*. Lutsk: PVD «Tverdynia», 2010. 460 s.
11. Markova M., Kravchenko D. 3D photogrammetry application for building inspection of cultural heritage objects. *Bulletin of PSACEA*. 2018. No 1(237-238). pp. 90-95. URL: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.170118.82.44>
12. Divakov V. V., Moskalkova Yu. G. Application of photogrammetry for the in-field building structural survey. *Problemy intehrovanoho rozvytku mist: zb. tez dop. mizhn. nauk.-prakt. konf. uch. ta stud.* Lutsk: LNTU-KNUBA, 2020. S.32-36. URL: <https://konf-mbg.wixsite.com/Intu-bci-mbg-2020>
13. Tang P., Huber D., Akinci B., Lipman R., Lytle A. Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques. *Automation in Construction*. 2010. Vol. 19. Is. 7. pp. 829-843. URL: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.06.007>
14. Synii S. V., Melnyk Yu. A., Sunak P. O., Ksonshkevych L. M., Krantovska O. M. Design of sewerage networks using the principles of SWOT analysis. *Modern technologies and methods of calculations in construction*. 2021. Vol. 16. pp. 171-179. URL: [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2021-6\(16\)-22](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2021-6(16)-22)
15. Synii S. V., Krantovska O. M., Ksonshkevych L. M., Orešković Matija, Sunak P. O. Rationale of structures of fencing of the territory of the Lutsk Zoo, taking into

account the analysis of the history of urbanization of landscape. *Modern technologies and methods of calculations in construction*. 2022. Vol. 17. pp. 138-145. URL: [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-7\(17\)-18](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-7(17)-18)

16. Han K.; DeGol J.; Golparvar-Fard M. Geometry- and Appearance-Based Reasoning of Construction Progress Monitoring. *J. Constr. Eng. Manag.* 2018. No 144. 04017110. URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001428](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001428)

17. EnviroSight. URL: <https://envirosight.com/>

18. CUES. URL: <https://cuesinc.com/>

19. WinCan. URL: <https://www.wincan.com/en/home/>

20. Rudneva I. Application of laser scanning for monitoring condition of buildings and structures during reconstruction. *Transfer of Innovative Technologies*. 2021. Vol. 4(1). pp. 33-36. URL: <https://doi.org/10.32347/tit2141.0106>

21. Bednarz L, Bajno D, Matkowski Z, Skrzypczak I, Leśniak A. Elements of Pathway for Quick and Reliable Health Monitoring of Concrete Behavior in Cable Post-Tensioned Concrete Girds. *Materials*. 2021. 14(6). 1503. URL: <https://doi.org/10.3390/ma14061503>

22. Krantovska O., Petrov M., Ksonshkevych L., Synii S., Sunak P. Improved engineering method for calculating the strength of the supporting areas of reinforced concrete elements. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 230. 02014. pp. 1-9. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823002014>

23. Krantovska O., Petrov M., Ksonshkevych L., Orešković M., Synii S., Ismailova N. Numerical simulation of the stress-strain state of complex-reinforced elements. *Technical Journal*. 2019. Vol. 13(2). pp.110-115. URL: <https://doi.org/10.31803/tg-20190417112619>

24. Protsenko S., Novytska O., Kizieiev M. Peculiarities of the new method of calculating the design heat load of building's heating systems according to DSTU EN 12831-1:2017. *Modern Technology, Materials and Design in Construction*. 2019. 25(2). pp. 140-144. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2018-2-140-144>

25. Previtali, M., Barazzetti, L., Brumana, R. et al. Automatic façade modelling using point cloud data for energy-efficient retrofitting. *Appl Geomat*. 2014. 6. 95-113. URL: <https://doi.org/10.1007/s12518-014-0129-9>

26. Sokolenko V. M., Podlevsky O. E., Sokolenko K. V. Reconstruction of the residential area of an industrial city take into account the demographic condition. *Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian national university*. 2019. No 7(255). pp. 60-63. URL: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2019-255-7-60-63>

Список використаної літератури

1. Hermann M., Pentek T., Otto B. Design principles for industrie 4.0 scenarios. *49th Hawaii international conference on system sciences (HICSS)*. 2016. pp. 3928-3937. URL: <https://doi.org/10.1109/HICSS.2016.488>

2. Wu C., Yuan Y., Tang Y., Tian B. Application of Terrestrial Laser Scanning (TLS) in the Architecture, Engineering and Construction (AEC) Industry. *Sensors*. 2022. No 22(1). pp. 265. URL: <https://doi.org/10.3390/s22010265>
3. Hexagon AB. URL: <https://hexagon.com/>
4. Leica Geosystems AG. URL: <https://leica-geosystems.com/en-us/>
5. PromScan3D. URL: <https://www.promscan3d.com/>
6. AERO3D engineering. URL: <https://aero3d.ua>
7. Мірничий – геодезично-геологічна група. URL: <https://mirnychyj.com.ua/>
8. Xi W., Lu W. G. Formation mechanism of an adherent vortex in the side pump sump of a pumping station. *International Journal of Simulation Modelling*. 2021. Vol. 20. Is. 2. pp. 327-338. URL: <https://doi.org/10.2507/IJSIMM20-2-562>
9. Уль А. В., Мельник О. В., Рудик О. В., Мельник Ю. А., Синій С. В. Принципи моделювання динамічних систем при інженерно-геодезичному моніторингу споруд. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2021. Вип. 15. С. 85-92. URL: [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2021-5\(15\)-12](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2021-5(15)-12)
10. Мельник В. М., Шостак А. В. Кількісна стереомікрофрактографія: монографія. Луцьк: ПВД «Твердиня», 2010. 460 с.
11. Markova M., Kravchenko D. 3D photogrammetry application for building inspection of cultural heritage objects. *Bulletin of PSACEA*. 2018. No 1(237-238). pp. 90-95. URL: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.170118.82.44>
12. Диваков В. В., Москалькова Ю. Г. Применение фотограмметрии в обследовании зданий и сооружений. *Проблеми інтегрованого розвитку міст: зб. тез доп. міжн. наук.-практ. конф. уч. та студ.* Луцьк: ЛНТУ-КНУБА, 2020. С. 32-36. URL: <https://konf-mbg.wixsite.com/lnu-bci-mbg-2020>
13. Tang P., Huber D., Akinci B., Lipman R., Lytle A. Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques. *Automation in Construction*. 2010. Vol. 19. Is. 7. pp. 829-843. URL: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.06.007>
14. Синій С. В., Мельник Ю. А., Сунак П. О., Ксьоншкевич Л. М., Крантовська О. М. Проектування каналізаційних мереж з використанням принципів SWOT-аналізу. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2021. Вип. 16. С.171-179. URL: [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2021-6\(16\)-22](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2021-6(16)-22)
15. Синій С. В., Крантовська О. М., Ксьоншкевич Л. М., Орешкович М., Сунак П. О. Обґрунтування споруд огороження території Луцького зоопарку з урахуванням аналізу історії урбанізації ландшафту. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2022. Вип. 17. С. 138-145. URL: [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-7\(17\)-18](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-7(17)-18)
16. Han K.; DeGol J.; Golparvar-Fard M. Geometry- and Appearance-Based Reasoning of Construction Progress Monitoring. *J. Constr. Eng. Manag.* 2018. No 144. 04017110. URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001428](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001428)
17. Envisights. URL: <https://envisights.com/>

18. CUES. URL: <https://cuesinc.com/>
19. WinCan. URL: <https://www.wincan.com/en/home/>
20. Руднева І. Застосування лазерного сканування для моніторингу стану будівель та споруд при реконструкції. *Трансфер інноваційних технологій*. 2021. Вип. 4(1). С.33–36. URL: <https://doi.org/10.32347/tit2141.0106>
21. Bednarz L, Bajno D, Matkowski Z, Skrzypczak I, Leśniak A. Elements of Pathway for Quick and Reliable Health Monitoring of Concrete Behavior in Cable Post-Tensioned Concrete Girds. *Materials*. 2021. 14(6). 1503. URL: <https://doi.org/10.3390/ma14061503>
22. Krantovska O., Petrov M., Ksonshkevych L., Synii S., Sunak P. Improved engineering method for calculating the strength of the supporting areas of reinforced concrete elements. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 230. 02014. pp. 1-9. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823002014>
23. Krantovska O., Petrov M., Ksonshkevych L., Orešković M., Synii S., Ismailova N. Numerical simulation of the stress-strain state of complex-reinforced elements. *Technical Journal*. 2019. Vol. 13(2). pp.110-115. URL: <https://doi.org/10.31803/tg-20190417112619>
24. Проценко С. Б., Новицька О. С., Кізєєв М. Д. Особливості нової методики розрахунку проектного теплового навантаження систем опалення будівель за ДСТУ EN 12831-1:2017. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2019. Т.25. №2. С.140-144. URL: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2018-2-140-144>
25. Previtali M., Barazzetti L., Brumana R. et al. Automatic façade modelling using point cloud data for energy-efficient retrofitting. *Appl Geomat*. 2014. 6. 95-113. URL: <https://doi.org/10.1007/s12518-014-0129-9>
26. Соколенко В. М., Подлевський О. Е., Соколенко К. В. Реконструкція забудови індустріального міста з урахуванням демографічного стану. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2019. №7(255). С.60-63. URL: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2019-255-7-60-63>

ДИСТАНЦІЙНИЙ МОНІТОРИНГ УРБАНІЗОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ

REMOTE SENSING MONITORING OF URBANIZED AREAS

Уль А.В., д.т.н., проф. (Волинський національний університет ім. Лесі Українки), Мельник О.В., к.т.н., доц. (Волинський національний університет ім. Лесі Українки), Мельник Ю.А., к.т.н., доц. (Луцький національний технічний університет), Мельничук М.М., аспірант (Волинський національний університет ім. Лесі Українки)

Uhl A.V., Dr.Tech in Engineering, Professor (Lesya Ukrainka Volyn National University), Melnyk O.V., PhD in Engineering, associate professor (Lesya Ukrainka Volyn National University), Melnyk Y.A., PhD in Engineering, associate professor (Lutsk National Technical University), Melnychuk M.M., PhD student (Lesya Ukrainka Volyn National University)

Зростання міст безпосередньо впливає на процеси міського розвитку як на рівні міста, так і на рівні районів, але, з іншого боку, на зростання також впливають земельна та житлова політика, поточна площа забудови, доступна територія для забудови, зміна кількості домогосподарств, населення, економіка та ін. Методи дистанційного зондування та ГІС можна використовувати для аналізу та моделювання зростання міст. Це дослідження було проведено, щоб визначити та проаналізувати зростання міста Луцька. В роботі застосовано кілька статистичних методів, щоб розпізнати та проаналізувати цю закономірність, яка показує динаміку розвитку міста в період з 2016 по 2022 роки. Окрім отриманих результатів, це дослідження також демонструє потенціал дистанційного зондування, методів ГІС та можливостей хмарних сервісів Google Earth Engine для аналізу зростання міст.

Urban growth directly affects urban development processes at both the city and district level, but on the other hand, land and housing policies, current built-up area, available land for development, changes in the number of households, population, economy also affect growth etc. Remote sensing and GIS techniques can be used to analyze and model urban growth. This study was conducted to identify and analyze the growth of the city of Lutsk. The work uses several statistical methods to recognize and analyze this regularity, which shows the dynamics of the city's development in the period from 2016 to 2022. In addition to the obtained results, this study also demonstrates the potential of remote sensing, GIS methods, and the capabilities of Google Earth Engine cloud services to analyze urban growth.

To study the expansion of the urban study area, the Dynamic World dataset, which is near-real-time (NRT) with a resolution of 10 m, was used as a basis, which includes

the distribution and information of nine classes of land use structure and land cover (Land Use/Land Cover (LULC)).

The Sentinel-2 MSI image collection is available from 06/27/2015 to the present. Sentinel-2 satellites are repeated every 2 to 5 days depending on the latitude. Dynamic world forecasts are generated for Sentinel-2 L1C images with maximum cloud cover less than 35%. Forecasts are masked to remove clouds and cloud shadows using a combination of the S2 Cloud Probability, Cloud Displacement Index, and Directional Distance Transform algorithms. In total, 615 Sentinel-2 images were used in the work for the period from March 25, 2016 to November 9, 2022.

In this study, the method of controlled classification according to the CART (Classification and Regression Tree) algorithm was used.

The results of this study demonstrated the following facts:

- *the city demonstrates stable growth over different periods of time,*
- *the maximum expansion of the built-up area was observed in the southern and southeastern directions and fragmentary construction in other directions*
- *research has established that the expansion of the outskirts is dominant in all selected periods and occurs in part of the suburban areas of the city.*

Due to the limited areas of the city and free lands, it is necessary to carry out rational control and management of urban growth and dynamics.

The proposed technique can be used to analyze not only urban areas, but also other types of land cover and land use.

Ключові слова: розвиток міст, урбанізовані території, дистанційне зондування, класифікація зображень, алгоритм CART, Google Earth Engine.

Keywords: urban development, urban areas, remote sensing, image classification, CART algorithm, Google Earth Engine.

Вступ. Швидка та незапланована урбанізація у світі викликає тривогу [1]. Оскільки міста ростуть угору та назовні, землекористування та розростання міст стали двома головними життєво важливими питаннями міських досліджень. Зі збільшенням населення та його активності межі міста починають розширюватися уздовж міських околиць, що призводить до фрагментованої міської морфології, а це впливає на місцеву екологію та навколишнє середовище [2]. Одними з найважливіших екологічних проблем, пов'язаних із швидким розширенням міст, є зміна клімату, забруднення повітря та води [3], які погіршують якість життя сільських і міських жителів. У результаті інтенсивної урбанізації в центральних регіонах розпорошене зростання або розростання відбулося у приміській зоні та на зовнішній околиці міста [4]. Приміська експансія міст або мегаполісів призводить до розширення, де сільські землекористування частково або повністю перетворюються на міські.

Аналіз останніх досліджень

Що стосується типів або форм міського зростання, деякі автори визначили три типи міського зростання, а саме: розширення краю, заповнення та розширення віддалених місць [5, 6]. Розширення країв міст

представляє собою поступову забудову вільних земельних ділянок, що поширюються від околиць старої та існуючої міської забудови. Окрім планомірного розширення урбанізованих територій, можна також розглядати стрибкоподібне розширення, розосереджене на значній відстані від розвинутих районів міст.

Традиційні методи дослідження та картографування є дорогими та трудомісткими для оцінки розширення міст. Даний тип інформації недоступний для більшості міст. На сьогодні збільшується роль використання досліджень із використанням дистанційного зондування (ДЗ) у поєднанні з геоінформаційними системами (ГІС). Дистанційне зондування та ГІС, незважаючи на економічну та технологічну ефективність, є надійними методами моніторингу та аналізу розширення міст [7, 8]. До сьогодні було проведено багато досліджень з цих питань, їх наслідків для землекористування/зміни земельного покриву для різних мегаполісів [2, 9], Мумбаї [10], Делі [11], Калькутта [12]. У роботі [13] особливу увагу приділено великим і середнім містам. Хоча малі/середні міста чи містечка роблять важливий внесок у міський розвиток, вони часто ігноруються у дослідженнях.

Постановка завдання

Місто Луцьк, обласний центр Волинської області, було обрано як область дослідження для кращого розуміння міської динаміки в середніх містах України, хоча природа міської динаміки та інтенсивність зростання міста залежить від різних факторів.

Це дослідження спрямоване на аналіз землекористування та зміни ґрунтового покриву, визначення та моніторинг просторового розширення міста Луцька та його околиць в радіусі 10 км від його центральної частини в період з 2016 по 2022 роки із використанням даних дистанційного зондування та алгоритмів їх обробки.

Виклад основного матеріалу

Джерела даних

Для вивчення міської території в межах об'єкта дослідження, було використано за основу набір даних Dynamic World, котрий майже в реальному часі (near-real-time (NRT)) має роздільну здатність 10 м, що включає розподіл та інформацію про дев'ять класів структури землекористування та земельного покриву (Land Use/Land Cover (LULC)).

Колекція знімків Sentinel-2 MSI доступна з 27.06.2015 по теперішній час. Частота повторного знімання супутниками Sentinel-2 становить від 2 до 5 днів, залежно від широти. Прогнози динамічного світу генеруються для зображень Sentinel-2 L1C з максимальною хмарністю менше 35%. Прогнози маскуються для видалення хмар і хмарних тіней за допомогою комбінації алгоритмів S2 Cloud Probability, Cloud Displacement Index і Directional Distance Transform. Загалом в роботі було використано 615 знімків Sentinel-2 на період з 25.03.2016 по 09.11.2022 року.

Для верифікації отриманих станів структури землекористування та земельного покриття, а також частки урбанізації було використано композитні зображення на відповідний період.

Класифікація зображень

У цьому дослідженні була застосована методика контрольованої класифікації за алгоритмом CART (Classification and Regression Tree).

Алгоритм CART призначений для побудови бінарного дерева рішень, вузол яких має при розщепленні лише двох нащадків. Для алгоритму CART «поведінка» об'єктів обраної групи означає частку модального (найчастішого) значення вихідної ознаки. До обраних груп відносяться ті, для яких ця пропорція досить висока. На кожному кроці побудови дерева сформоване в вузлі правило ділить заданий набір прикладів на дві частини: частину, в якій виконано правило (нащадок правий) і частину, в якій правило не виконується (нащадок лівий). Основною перевагою роботи алгоритму CART є впевненість у тому, що за наявності бажаних визначень у досліджуваній сукупності вони будуть виявлені. Крім того, CART дозволяє не «закриватися» на єдиному значенні функції виведення, а продовжувати пошук, допоки всі такі значення, для яких можливо віднайти відповідний пояснювальний вираз.

Для створення навчальної вибірки було випадковим чином створено 10000 точок в області інтересу, після чого кожній з них було присвоєно атрибут класу, відповідно до даних колекції Dynamic World [14]. Отриманий набір геопросторових даних був використаний для "навчання" класифікатора.

Дані дистанційного зондування були отримані та опрацьовані в середовищі Google Earth Engine [15]. Це хмарна платформа для аналізу геопросторових даних у планетарному масштабі. Вона дозволяє використовувати величезні обчислювальні потужності Google для вивчення найрізноманітніших проблем: втрати лісів та заліснення територій, посух та повеней, різноманітних стихійних лих, перебігу епідемій, продовольчої безпеки, управління водно-болотними ресурсами, захисту навколишнього середовища зміни клімату тощо. Earth Engine є унікальною платформою, оскільки дозволяє розширити спектр можливостей не тільки вчених, що займаються дистанційним зондуванням Землі, а й більш ширшої аудиторії, котрій не вистачає обчислювальних можливостей використовувати класичні геоінформаційні системи для обробки великих масивів просторово-часових даних. До появи Earth Engine аналіз великих геоданих могли робити тільки вузькопрофільні фахівці, що мають доступ до високопродуктивних обчислювальних ресурсів.

Результати дослідження

За результатами обробки даних дистанційного зондування було визначено відсотковий розподіл площ структури землекористування та

земельного покриття та його щорічну динаміку з 2016 по 2022 рік (табл. 1.), (рис. 1).

Таблиця 1

Відсотковий розподіл площ структури землекористування та земельного покриття

№	Назва класу	Роки						
		2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
1	Відкритий ґрунт	0,05	0,05	0,07	0,10	0,24	0,07	0,22
2	Забудова	29,67	29,59	30,49	30,61	30,99	31,32	31,93
3	С/г угіддя	41,96	40,89	43,28	41,37	45,20	42,61	43,11
4	Заболочені території	0,09	0,07	0,06	0,13	0,12	0,02	0,08
5	Трав'яна рослинність	6,63	7,34	7,03	7,06	6,67	6,03	5,73
6	Чагарники	1,26	0,38	1,01	0,59	2,29	0,37	0,61
7	Ліси	19,48	20,83	17,21	19,30	13,45	18,54	17,53
8	Відкриті водойми	0,85	0,85	0,85	0,86	1,02	0,66	0,78

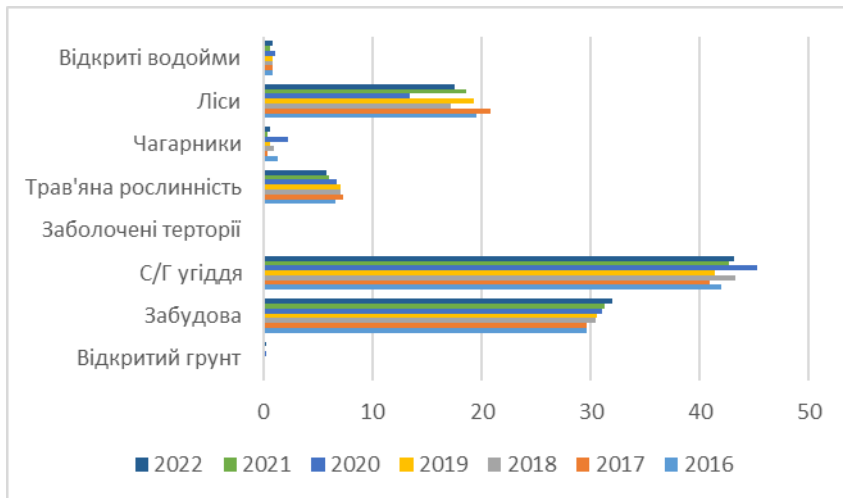


Рис. 1. Відсотковий розподіл площ структури землекористування та земельного покриття

Результат класифікації показує, що площа забудови поступово зростала з 29,67% у 2016 році до 31,93 у 2022 році. Як свідчать дані, протягом 2016–2022 років площа сільськогосподарських угідь коливалась в межах 40,89% - 45,20% із максимальним значенням у 2020 році.

Спостерігається хвилюподібне скорочення кількості лісових насаджень та збільшення площ відкритих необроблених ґрунтів.

Графічно розподіл значень класів за результатами контрольованої класифікації для кожного із 615 зображень представлений на рис. 2.

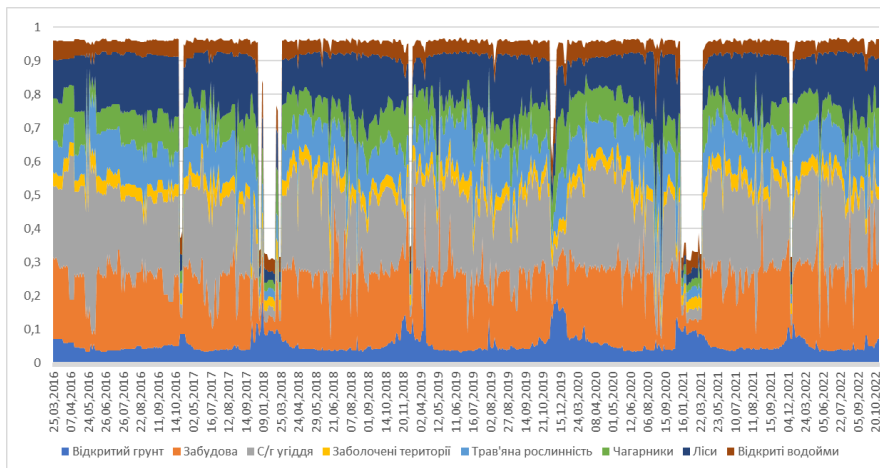


Рис. 2. Розподіл значень класів

Слід зазначити, що наявні на графіку прогалини зумовлені значним сніговим покривом на відповідні періоди, котрий не дозволив алгоритму достовірно визначити класи пікселів зображення.

Оверлей результату контрольованої класифікації для одного із зображень 2022 року на основу Google Earth Engine представлений на рис. 3.

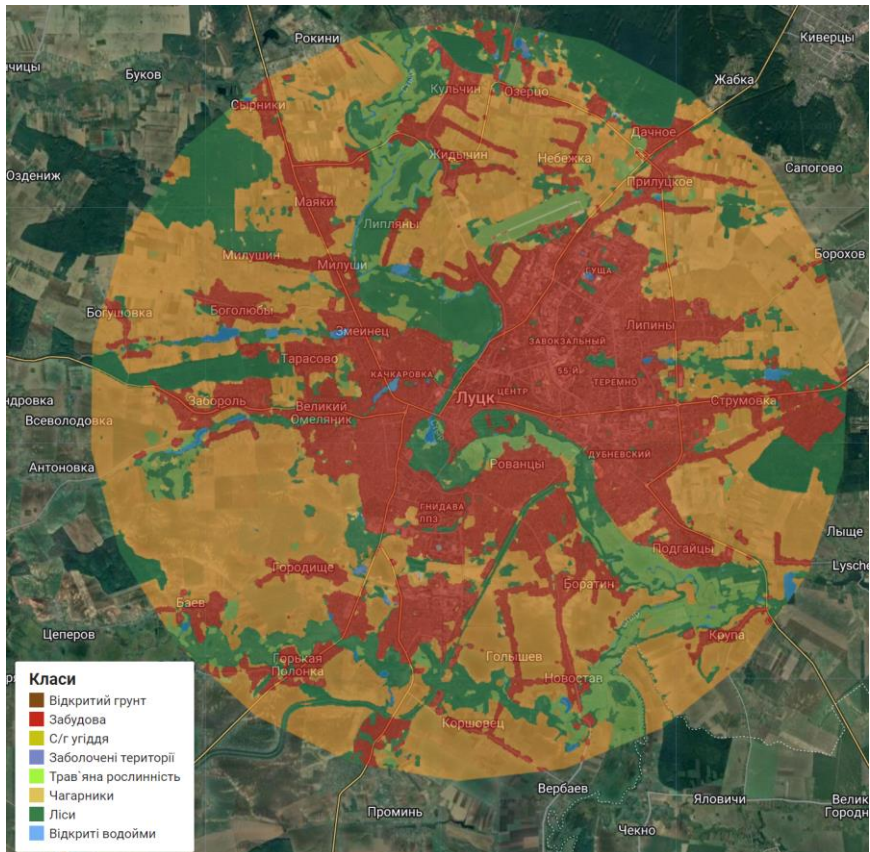


Рис. 3. Результат контрольованої класифікації

Оскільки основною метою даної роботи є аналіз урбанізованих територій, на основі класифікованих зображень було виділено урбанізовані території станом на 2016 рік та досліджено динаміку їх розвитку до 2022 року. Відповідна графічна інтерпретація представлена на рис. 4 та рис. 5.

З аналізу отриманих даних видно, що ріст площ урбанізованих територій в основному припадає на південну та південно-східну частину досліджуваної території в межах с. Рованці, с. Боратин та с. Струмівка.

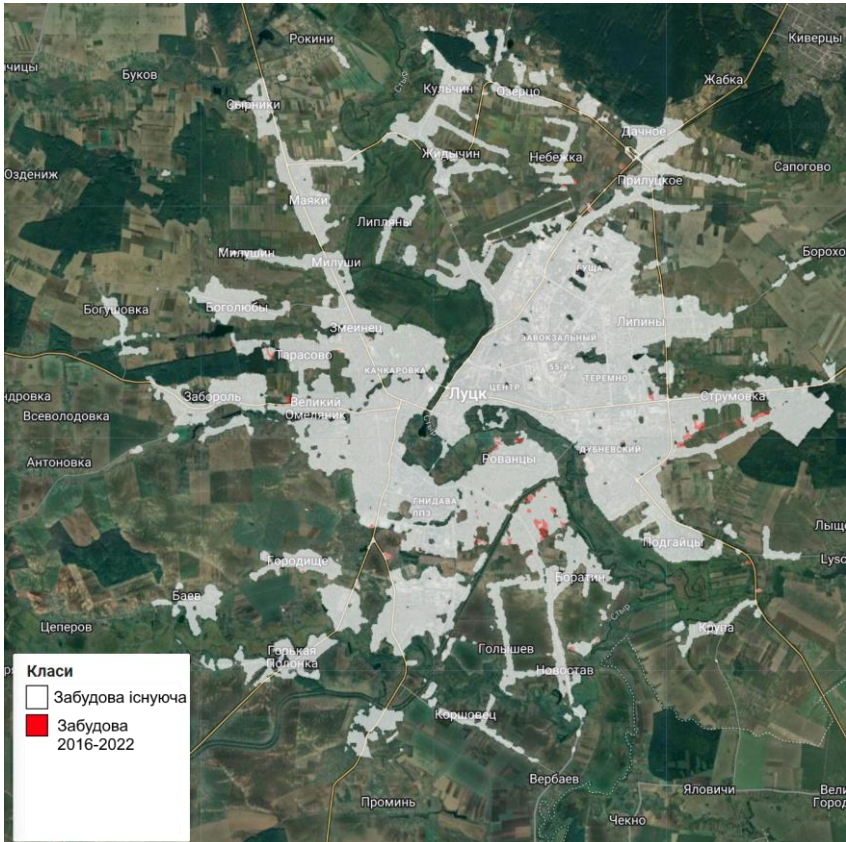


Рис. 4. Аналіз урбанізованих територій.

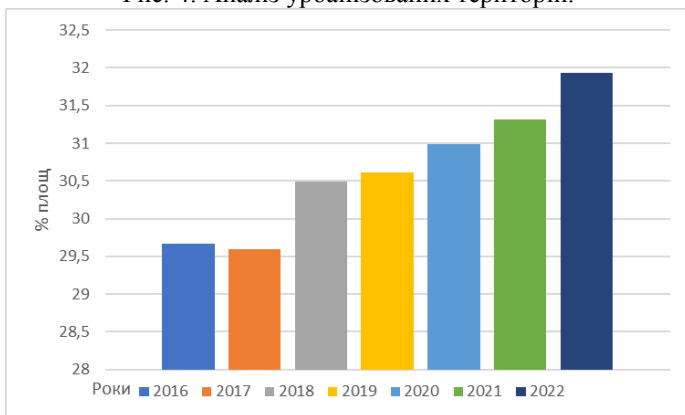


Рис. 5. Динаміка зміни площі урбанізованих територій

Оцінка точності

Під час здійснення контрольованої класифікації виникає деяка кількість помилок через спектральну подібність класів або помилки користувача під час визначення завіркових ділянок. Для цього здійснено оцінку точності класифікації земельного покриття для визначення і вимірювання значень похибок отриманого зображення. Найпоширенішим методом оцінки точності є розрахунок матриці похибок [16] в якій порівнюються дані отриманого зображення з контрольними даними для відповідної кількості класифікаційних одиниць. Відповідно, на основі отриманої матриці похибок розраховується загальна точність класифікації, як відношення вірно класифікованих елементів до загальної кількості елементів вибірки.

Оцінка точності використовувалася для перевірки класифікації шляхом використання 30% контрольних точок, отриманих на початковому етапі. Референтне значення, введене дослідником, базується на даних про достовірність ґрунту. У цій класифікації точність виробника (включає в себе упущення помилки, що відноситься до ступеня спостережуваного аспекту на місцевості, який не класифікується на карті) і точність користувача (оцінює упущення помилки і пояснює можливість того, що піксель класифікується у відповідну категорію).

Матриці похибок були розраховані для оцінки точності класів землекористування та земельного покриття. Існує чотири конкретні статистичні показники точності, а саме: загальна точність (Overall accuracy(OA)), точність виконавця (Producer accuracy(PA)), точність користувача (User accuracy(UA)) та коефіцієнт κ , які були отримані для оцінки точності класифікації. Найбільш репрезентативними з них є загальна точність (OA) та коефіцієнт κ . Загальна точність класифікації становить $OA_{2016}=94\%$, $\kappa_{2016}=0.92$ та $OA_{2022}=97\%$, $\kappa_{2022}=0.96$ для знімків 2016 та 2022 років, відповідно.

Висновки

Динаміка структури земельного покриття та землекористування, проаналізована за допомогою даних дистанційного зондування та ГІС, показала ефективність визначення минулого та майбутнього міст, а також типологію та розвиток міст, які можуть бути корисними органам місцевої влади для можливості керувати зростанням та розвитком цієї території. Огляд літератури встановив, що більшість досліджень було проведено для міст-мільйонників. Проблеми середніх міст відрізняються від проблем великих мегаполісів. У цьому дослідженні зроблено спробу з'ясувати унікальні особливості міського розвитку такого середнього міста, як Луцьк. Запропонована в роботі методика може бути масштабована до менших міст та містечок або ж до рівня агломерацій. Результати цього дослідження продемонстрували наступні факти:

- місто демонструє стабільне зростання у різні часові періоди;

- максимальне розширення забудованої території спостерігалось в південному та південно-східному напрямку та фрагментарну забудову в інших напрямках;
- дослідженням встановлено, що експансія окраїни є домінуючою в усіх вибраних періодах і відбувається в частині приміських зон міста.

Через обмеженість територій міста та вільних земель необхідно здійснювати раціональний контроль та управління міським ростом і динамікою.

Запропонована методика може бути використана для аналізу не тільки урбанізованих територій, а й інших видів земельного покриття та землекористувань. Завдяки хмарним сервісам Google Earth Engine стало можливим здійснювати обробку великих масивів даних дистанційного зондування без використання потужного і дороговартісного апаратного та програмного забезпечення.

References

1. Vinoth Kumar, J. A., Pathan, S. K., Bhanderi, R. J. Spatio-temporal analysis for monitoring urban growth – a case study of Indore City. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. 2007. Vol. 35, No. 1. C. 11–20.
2. Roy, B., Kasemi, N. Monitoring urban growth dynamics using remote sensing and GIS techniques of Raiganj Urban Agglomeration, India. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. 2021. Vol. 24, No. 2. C. 221–230.
3. Hassan Rashid, M. A. ul, Manzoor, M. M., Mukhtar, S. Urbanization and Its Effects on Water Resources: An Exploratory Analysis. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*. 2018. Vol. 15. C. 67–74.
4. H S, S., Ramachandra, T. V, Jagadish, K. Urban sprawl: Metrics, dynamics and modelling using GIS. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2004. Vol. 5. C. 29–39.
5. Sun, C., Wu, Z., Lv, Z., та ін. Quantifying different types of urban growth and the change dynamic in Guangzhou using multi-temporal remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2013. Vol. 21. C. 409–417.
6. Wilson, E., Hurd, J., Civco, D., та ін. Development of a Geospatial Model to Quantify, Describe and Map Urban Growth. *Remote Sensing of Environment*. 2003. Vol. 86. C. 275–285.
7. Wang, H., Gong, X., Wang, B., та ін. Urban development analysis using built-up area maps based on multiple high-resolution satellite data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2021. Vol. 103. C. 102500.
8. La, Y., Bagan, H., Yamagata, Y. Urban land cover mapping under the Local Climate Zone scheme using Sentinel-2 and PALSAR-2 data. *Urban Climate*. 2020. Vol.

33. С. 100661.

9. Aithal, D. B., Shivamurthy, V., Ramachandra, T. V. Simulating urban growth by two state modelling and connected network. *Modeling Earth Systems and Environment*. 2018.

10. Kandpal, R., Saizen, I. An evaluation of the relative urbanisation in peri-urban villages affected by industrialisation: the case study of Bhiwandi in the Mumbai Metropolitan Region, India. *Spatial Information Research*. 2019. Vol. 27, No. 2. С. 137–149.

11. Wentz, E. A., Nelson, D., Rahman, A., та ін. Expert system classification of urban land use/cover for Delhi, India. *International Journal of Remote Sensing*. 2008. Vol. 29, No. 15. С. 4405–4427.

12. Bhatta, B. Analysis of urban growth pattern using remote sensing and GIS: a case study of Kolkata, India. *International Journal of Remote Sensing*. 2009. Vol. 30, No. 18. С. 4733–4746.

13. Jat, M., Garg, P., Khare, D. Assessment of urban growth pattern using spatial analysis techniques06.

14. Brown, C. F., Brumby, S. P., Guzder-Williams, B., та ін. Dynamic World, Near real-time global 10 m land use land cover mapping. *Scientific Data*. 2022. Vol. 9, No. 1. С. 251.

15. Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., та ін. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*. 2017. Vol. 202. С. 18–27.

16. Melnyk, O. V., Manko, P. V. Klasyfikatsiia lisovykh masyviv Volyni za danymy bahatospektralnykh suputnykovykh znimkiv. *ScienceRise*. 2018. Vol. 9. С. 25–30.

Список використаної літератури

1. Vinoth Kumar, J. A., Pathan, S. K., Bhanderi, R. J. Spatio-temporal analysis for monitoring urban growth – a case study of Indore City. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. 2007. Vol. 35, No. 1. С. 11–20.

2. Roy, B., Kasemi, N. Monitoring urban growth dynamics using remote sensing and GIS techniques of Raiganj Urban Agglomeration, India. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. 2021. Vol. 24, No. 2. С. 221–230.

3. Hassan Rashid, M. A. ul, Manzoor, M. M., Mukhtar, S. Urbanization and Its Effects on Water Resources: An Exploratory Analysis. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*. 2018. Vol. 15. С. 67–74.

4. H S, S., Ramachandra, T. V, Jagadish, K. Urban sprawl: Metrics, dynamics and modelling using GIS. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2004. Vol. 5. С. 29–39.

5. Sun, C., Wu, Z., Lv, Z., та ін. Quantifying different types of urban growth and the change dynamic in Guangzhou using multi-temporal remote sensing data.

International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2013. Vol. 21. C. 409–417.

6. Wilson, E., Hurd, J., Civco, D., та ін. Development of a Geospatial Model to Quantify, Describe and Map Urban Growth. *Remote Sensing of Environment*. 2003. Vol. 86. C. 275–285.

7. Wang, H., Gong, X., Wang, B., та ін. Urban development analysis using built-up area maps based on multiple high-resolution satellite data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2021. Vol. 103. C. 102500.

8. La, Y., Bagan, H., Yamagata, Y. Urban land cover mapping under the Local Climate Zone scheme using Sentinel-2 and PALSAR-2 data. *Urban Climate*. 2020. Vol. 33. C. 100661.

9. Aithal, D. B., Shivamurthy, V., Ramachandra, T. V. Simulating urban growth by two state modelling and connected network. *Modeling Earth Systems and Environment*. 2018.

10. Kandpal, R., Saizen, I. An evaluation of the relative urbanisation in peri-urban villages affected by industrialisation: the case study of Bhiwandi in the Mumbai Metropolitan Region, India. *Spatial Information Research*. 2019. Vol. 27, No. 2. C. 137–149.

11. Wentz, E. A., Nelson, D., Rahman, A., та ін. Expert system classification of urban land use/cover for Delhi, India. *International Journal of Remote Sensing*. 2008. Vol. 29, No. 15. C. 4405–4427.

12. Bhatta, B. Analysis of urban growth pattern using remote sensing and GIS: a case study of Kolkata, India. *International Journal of Remote Sensing*. 2009. Vol. 30, No. 18. C. 4733–4746.

13. Jat, M., Garg, P., Khare, D. Assessment of urban growth pattern using spatial analysis techniques06.

14. Brown, C. F., Brumby, S. P., Guzder-Williams, B., та ін. Dynamic World, Near real-time global 10 m land use land cover mapping. *Scientific Data*. 2022. Vol. 9, No. 1. C. 251.

15. Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., та ін. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*. 2017. Vol. 202. C. 18–27.

16. Мельник, О. В., Манько, П. В. Класифікація лісових масивів Волині за даними багатоспектральних супутникових знімків. *ScienceRise*. 2018. Vol. 9. C. 25–30.

**ВИКОРИСТАННЯ ЗОЛЬНИХ ВІДХОДІВ ПРИ БУДІВНИЦТВІ
ГРУНТОВИХ ОСНОВ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ**

**EVERYTHING OF ASH WASTE IN THE CONSTRUCTION OF ROAD
FOUNDATIONS**

Фоменко О.О., асис. (Харківський національний автомобільно-дорожній університет), Седов А.В., к.т.н., доц. (Харківський національний автомобільно-дорожній університет)

Fomenko O.O., assistant (Kharkiv National Automobile and Road University), Sedov A.V., Ph.D., assoc. (Kharkiv National Automobile and Road University)

Проаналізована можливість використання відходів, таких як шлаки, золи уносу, золошлаки від спалювання різних твердих паливних матеріалів у дорожньому будівництві. Запропоновано використання золи, яка виявляє у структурі матеріалу активність і має власні в'язучі властивості. Це дозволяє покращити порову структуру, міцність, водо- та зсувостійкість укріпленого ґрунту.

Strengthening of soils with various binding materials has been one of the most relevant topics of research in the field of road construction for several decades. Currently, numerous evidences have been obtained that the use of soil strengthening methods is the most important factor in reducing the cost and speeding up the pace of road construction. Soils strengthened with organic binders also have disadvantages, which include their insufficient water resistance, high dependence of work performance on weather conditions, a limited range of soils suitable for bituminous treatment, a long period of bituminous soil structure formation in conditions of mandatory traffic regulation. The paper analyzes the possibility of using waste, such as slag, fly ash, ash slag from the burning of various solid fuel materials in road construction. Ash is a conglomerate of small (from 1-2 μm to 10-50 μm) particles; the main components of ash are SiO_2 (more than 50%), CaO (about 6%), the rest - phosphates of iron, calcium, hematite, silicates of calcium, magnesium, iron, potassium, aluminum, sodium. It is proposed to use ash, which shows activity in the structure of the material and has its own binding properties. This makes it possible to improve the pore structure, strength, water and shear resistance of reinforced soil. The resulting material had good strength, but low elasticity. To provide greater elasticity of the material, it is possible to use organic binders, such as bitumen. When processing mineral materials with bitumen, new systems are formed that have a complex of physical and mechanical properties inherent in coagulation-type structures. The results of shear testing of ash-soil mixtures confirm that ash in mixtures with soil treated with bitumen is an active component in the processes of structuring of road construction material.

Ключові слова: цементогрунт, зологрунтова суміш, дорожній одяг.
Key words: cement soil, ash-soil mixture, road wear.

Одним із перспективних шляхів отримання якісного дорожнього одягу є удосконалення технології будівництва автомобільних доріг із застосуванням методів стабілізації (зміцнення) місцевих ґрунтів та відходів промисловості в конструкціях дорожніх одягів та робочого шару земляного полотна [1]. Причому за рахунок великої кількості відходів промислового виробництва, а також їх глибокої вивченості рекомендується широке застосування їх у будівництві доріг.

Зміцнення ґрунтів різними в'язучими матеріалами вже кілька десятиліть є однією з найактуальніших тем досліджень у галузі дорожнього будівництва. В даний час отримані численні докази того, що застосування методів зміцнення ґрунтів є найважливішим фактором здешевлення та прискорення темпів будівництва доріг (рис. 1).

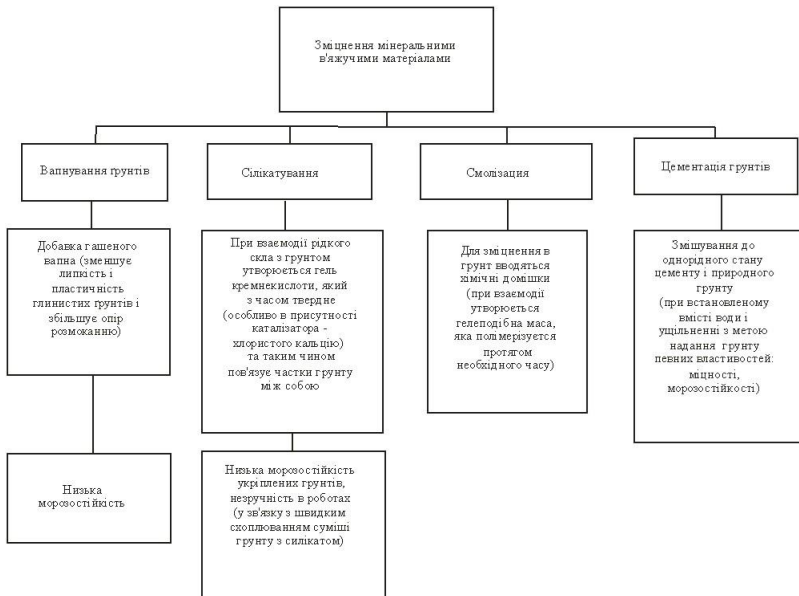


Рис. 1. Методи зміцнення ґрунту мінеральними в'язучими матеріалами

У таких монолітних основ присутній ряд переваг проти класичних дискретних (щебених) основ:

- зсувостійкість, більш високий модуль пружності;
- функції переривання капілярів, що не дозволяють ґрунтовим водам проникати в тіло дорожнього одягу;
- підвищені теплоізоляційні показники, що покращує морозостійкість всієї конструкції.

Не зважаючи на переваги, цементогрунти при їх використанні в дорожніх конструкціях мають такі недоліки, як зайва жорсткість і низька тріщиностійкість.

Вплив різних чинників на властивості одержуваного матеріалу розглянуто у роботах Безрука В.М. [2], Морозова С.С. [3], Єленовича А.С. [4] та інших дослідників. Детальне вивчення впливу мінералогічного складу ґрунтів, що зміцнюються, на кінетику твердіння і на кінцеву міцність цементогрунту було проведено Гончаровою Л.В. [5]. Цими дослідженнями було встановлено, що найбільшу негативну дію на зміцнення ґрунтів цементом мають такі фактори:

- підвищена кислотність ґрунтів ($\text{pH} = 4,5 - 5,5$);
- підвищений вміст (понад 20%) у комплексі катіонів натрію у солонців різного типу;
- часте надмірне зволоження ґрунтів, що ускладнює виконання робіт і перешкоджає високій щільності цементогрунту при його ущільненні;
- глибоке промерзання земляного полотна у сильні морози, що викликає необхідність надання цементогрунту підвищеної морозостійкості та водостійкості.

У деяких випадках для надання ґрунтам заданих властивостей необхідна надмірна витрата в'язучих матеріалів, що не виправдано економічно.

ґрунти, зміцнені органічними в'язучими, також мають недоліки, до яких можна віднести їх недостатню водостійкість, велику залежність виконання робіт від погодних умов, обмежене коло ґрунтів, придатних для обробки бітумом, тривалий період формування структури бітумогрунту в умовах обов'язкового регулювання руху [1].

Надання ґрунту структури з вищою тріщиностійкістю можливе введенням золи, що забезпечить необхідні експлуатаційні властивості дорожнього покриття.

У роботах вчених різних країн накопичено великий позитивний досвід використання відходів, таких як шлаки, золи уносу, золошлаки від спалювання різних твердих паливних матеріалів, які виявляють у структурі матеріалу активність і мають власні в'язучі властивості. Вирішенню цих проблем у різні роки присвячували свої роботи Гурячков І.Л. [6, 7], Волженський А.В. [8], Горелишев Н.В. [9] та ін.

Малі розміри та висока пористість золи, а, отже, велика сумарна поверхня частинок говорять про здатність матеріалу активно реагувати з рідким середовищем (водою, бітумом), що дозволяє використовувати його як активний заповнювач у суміші незв'язних ґрунтів із в'язучим [1].

Зола є конгломератом дрібних (від 1-2 мкм до 10-50 мкм) частинок; основними компонентами золи є SiO_2 (більше 50%), CaO (близько 6%), решта – фосфати заліза, кальцію, гематит, силікати кальцію, магнею, заліза, калію, алюмінію, натрію [1].

Різний колір показує включення різних фракцій. Світліше забарвлення показує більш дрібні частинки. Розподіл фракцій у золи наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Розподіл частинок за крупністю

Колір на фото	Вміст, %	Максимальний розмір	Ідентифікація
Темні	20-30 %	0,1 мм	Пісок
Коричневі	20-25 %	0,01 мм	Пил
Жовті	50-60 %	0,005 мм	Колоїди



Рис. 2. Зовнішній вигляд золи

На рис. 3 представлено знімок свіжої золи під мікроскопом.

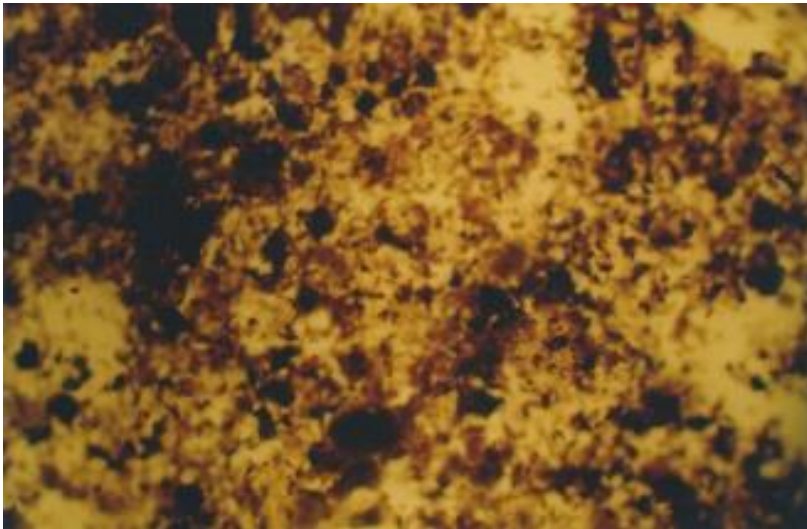


Рис. 3. Знімок свіжої золи під мікроскопом

Висновки з гранулометричного аналізу: зола має мономірність структури. Основна структура фракцій золи: пилюваті та колоїдні частинки. Активною речовиною в золі може виступати кремнезем, який активується в середовищі $\text{Ca}(\text{OH})_2$ і починає проявляти гідралічні (в'язучі) властивості [1].

Аналіз досліджень показує, що при використанні піщаних і супіщаних ґрунтів збільшення вмісту золи знижує водопоглинання матеріалу на 21%. Отриманий матеріал володіє гарною міцністю, але малою пружністю. Для надання більшої пружності матеріалу можливе використання органічних в'язучих, таких як бітум.

При застосуванні органічних в'язучих (зокрема, рідких бітумів) найбільш характерними процесами в період структуроутворення є фізико-хімічні процеси, що протікають на межі контакту вуглеводневої рідини із заповнювачами. При обробці мінеральних матеріалів бітумом утворюються нові системи, що мають комплекс фізико-механічних властивостей, притаманних структурам коагуляційного типу [10].

Збільшення дозування бітуму з 1% до 5% підвищує міцність зразків у 1,5-2 рази і за абсолютним значенням становить 0,58-1,40 МПа (рис. 4).

Аналіз досліджень показує, що збільшення вмісту золи до 60% у суміші підвищує показник водопоглинання більш, ніж у 3 рази.

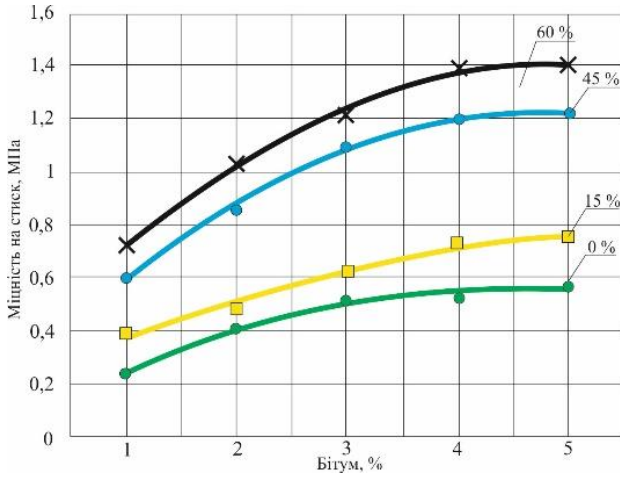


Рис. 4. Межа міцності при стиску зразків із суміші золи та ґрунту, оброблених бітумом

Однак додавання рідкого бітуму дозволяє знизити цей показник. Водопоглинання зразків із зологрунтової суміші, залежно від збільшення дозування бітуму від мас. 1% до 5%, знижується пропорційно дозуванню бітуму в 1,35-2 рази (рис. 5).

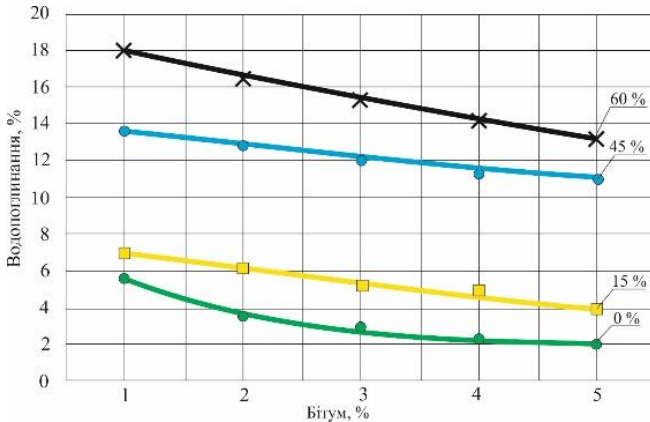


Рис. 5. Водопоглинання зразків із суміші золи та ґрунту, оброблених бітумом

Це зумовлено значною дисперсністю золи та невеликим вмістом в'язучого. Випробування зразків із зологрунтової суміші з бітумом

показали, що матеріал має достатні властивості для використання його в дорожніх конструкціях [1].

Коефіцієнт водостійкості зразків із зологрунтової суміші (рис. 6) показує, що додавання бітуму 4-5% в зологрунтову суміш із вмістом золи 15-45% є достатнім для отримання міцного водостійкого матеріалу [1].

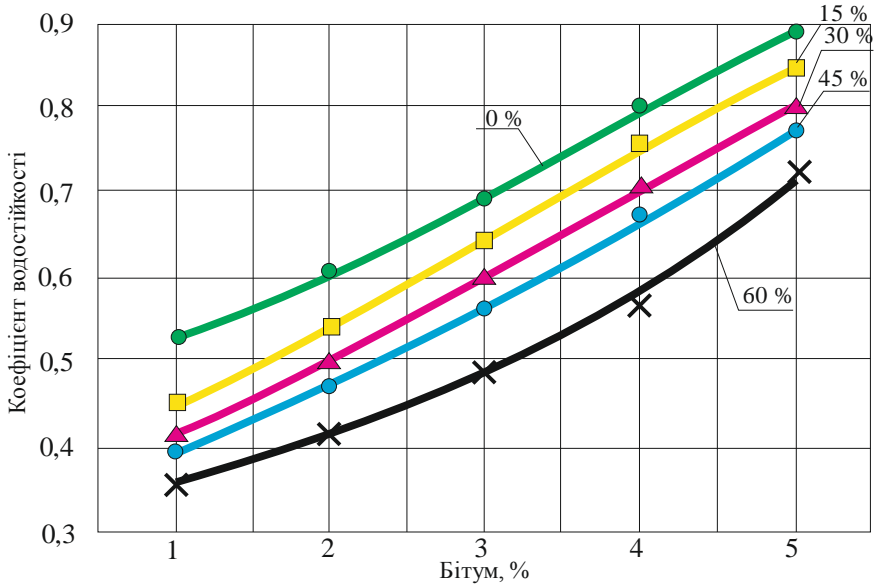


Рис. 6. Коефіцієнт водостійкості зразків із зологрунтової суміші, обробленої бітумом

Опір ґрунтів зсуву є основним фактором, що визначає поведінку ґрунту під навантаженням. При затримці процесів укладання та ущільнення суміші значення величини опору зсуву значно знижується. На рис. 7 наведені дані, які характеризують підвищення величини опору зсуву від вмісту золи у суміші при вмісті бітуму 4%.

Результати випробування зологрунтових сумішей на зсув підтверджують, що зола в сумішах з ґрунтом, оброблених бітумом, є активним компонентом у процесах структуроутворення дорожньо-будівельного матеріалу.

Результати досліджень показують потенційну можливість використання зологрунтових матеріалів, укріплених рідким бітумом, при влаштуванні шарів основи автомобільних доріг з капітальним або полегшеним дорожнім одягом.

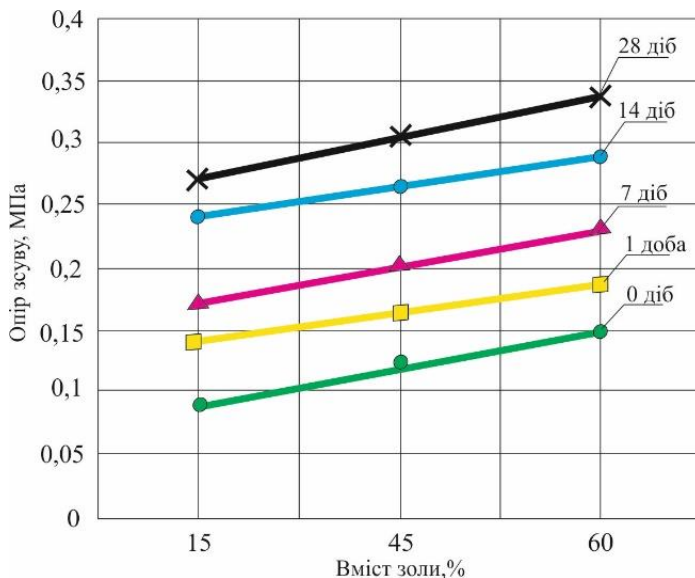


Рис. 7. Опір зсуву зологрунтової суміші, обробленої бігумом (4 %)

References

1. Zubova O. V. Yspolzovanye v lesnom dorozhnom stroytelstve zolohruntovykh smesei, obrabotannykh viazhushchymy materyalamy URL: <http://www.dslib.net/les-texnologiy/ispolzovanie-v-lesnom-dorozhnom-stroitelstve-zolohruntovykh-smesej-obrabotannyh.html> (data zvernennia: 20.10.2022).
2. Bezruk V. M. Teoretycheskye osnovy ukrepleniya hruntov tsementam / Bezruk V. M. M.: Avtotransyzdat, 1956. 248 s.
3. Morozov S. S. Sovremennoe sostoianye tekhnicheskoi melyoratsyy hruntov y stoiashchye pered nei zadachy. Tr.soveshch. po teoret. Osnovam tekhnich. Melyoratsyy hruntov. M.: Yzd-vo MHU, 1961, s. 29-40.
4. Bezruk V. M. Dorozhnye odezhdyy yz ukreplennykh hruntov / Bezruk V. M., Elenovych A. S. M.: Vysshaya shkola, 1969. 330 s.
5. Honcharova L. V. Osnovy yskusstvennogo uluchsheniya hruntov. M.: MHU, 1973. 375 s.
6. Huriachkov Y. L. Ukrepleniye suhlynystogo hrunta tsementom y dobavkoi zoly unosa: V kn.: Materyaly k V Soveshchaniyu po zakrepleniyu y uplotneniyu hruntov / Huriachkov Y. L. Novosybyrsk: NYZZhT, 1965. s. 563-567.
7. Huriachkov Y. L. Yssledovaniya po utochneniyu trebovaniy k zolam unosa, prymeriaemym v kachestve samostoiatel'nogo viazhushchego pry ukrepleniyu nesviaznykh hruntov. V sb.: Trudy Soiuzdornyy, vyp.82. M., 1975.

8. Volzhenskyi A. V. Prymenenye zol y toplyvnykh shlakov v proyzvodstve stroytelnykh materyalov / Volzhenskyi A. V., Yvanov Y. A., Vynogradov B. N. M.: Stroiyzdat, 1984. 255 s.

9. Horelyshev N. V. Asfaltobeton y druhye bytumomyneralnye materyaly./ Horelyshev N. V. M.: Mozhaisk-Terra, 1995. 176 s.

10. Zubova O. V. Yssledovanye vlyaniya hranulometrycheskoho sostava hruntov na prochnost zolohruntovoi smesy, obrabotanoi tsementom // Trudy BHTU. 2012. № 2. Lesnaia y derevoobrabatyvaiushchaia promyshlenno. 118-120 S.

Список використаної літератури

1. Зубова О. В. Использование в лесном дорожном строительстве зологрунтовых смесей, обработанных вяжущими материалами URL: <http://www.dslib.net/les-texnology/ispolzovanie-v-lesnom-dorozhnom-stroitelstve-zologruntovyh--smesej-obrabotannyh.html> (дата звернення: 20.10.2022).

2. Безрук В. М. Теоретические основы укрепления грунтов цементом / Безрук В. М. М.: Автотрансиздат, 1956. 248 с.

3. Морозов С. С. Современное состояние технической мелиорации грунтов и стоящие перед ней задачи. Тр.совещ. по теорет. Основам технич. Мелиорации грунтов. М.: Изд-во МГУ, 1961, с. 29-40.

4. Безрук В. М. Дорожные одежды из укрепленных грунтов / Безрук В. М., Еленович А. С. М.: Высшая школа, 1969. 330 с.

5. Гончарова Л. В. Основы искусственного улучшения грунтов. М.: МГУ, 1973. 375 с.

6. Гурячков И. Л. Укрепление суглинистого грунта цементом и добавкой золы уноса: В кн.: Материалы к V Совещанию по закреплению и уплотнению грунтов / Гурячков И. Л. Новосибирск: НИИЖТ, 1965. с. 563-567.

7. Гурячков И. Л. Исследования по уточнению требований к золам уноса, применяемым в качестве самостоятельного вяжущего при укреплении несвязных грунтов. В сб.: Труды Союздорнии, вып.82. М., 1975.

8. Волженский А. В. Применение зол и топливных шлаков в производстве строительных материалов / Волженский А. В., Иванов И. А., Виноградов Б. Н. М.: Стройиздат, 1984. 255 с.

9. Горельшев Н. В. Асфальтобетон и другие битумоминеральные материалы./ Горельшев Н. В. М.: Можайск-Тerra, 1995. 176 с.

10. Зубова О. В. Исследование влияния гранулометрического состава грунтов на прочность зологрунтовой смеси, обработанной цементом // Труды БГТУ. 2012. № 2. Лесная и деревообрабатывающая промышленно. 118-120 С.

ЦИЛІНДРИЧНИЙ ЗГИН ТРАНСВЕРСАЛЬНО-ІЗОТРОПНОЇ ПЛИТИ, ЧАСТКОВО ОБПЕРТОЇ НА ЖОРСТКИЙ ФУНДАМЕНТ

CYLINDRICAL BENDING OF A TRANSVERSALLY-ISOTROPIC SLAB PARTIALLY RESTING ON A RIGID FOUNDATION

Шваб'юк В.І., д.т.н., проф., Ротко С.В., к.т.н., доц., Шваб'юк В.В., к.т.н., доц., Бондарський О.Г., Ужегова О.А. (Луцький національний технічний університет, м. Луцьк)

Shvabyuk V.I., Dr. Tech. Sc., Professor, Rotko S.V., Ph.D., associate professor, Shvabyuk V.V., Ph.D., associate professor, Bondarskyi O.G. Ph.D. in Engineering, associate professor, Uzhehova O.A., PhD in Engineering, Associate Professor (Lutsk National Technical University, Lutsk)

У постановці уточненої моделі згину трансверсально-ізотропних плит середньої товщини розв'язана контактна задача циліндричного згину плити, центральна область якої частково контактує із жорстким фундаментом, а по краях піднята на певну висоту розподіленим уздовж її краю зусиллям.

In setting up a refined model of bending of transversely isotropic plates of medium thickness, the contact problem of cylindrical bending of the plate, the central area of which is partially in contact with the rigid foundation, and the edges are raised to a certain height by forces distributed along its edge, is solved. The solution of the fourth-order differential equation was obtained, as well as the formulas for the distribution of contact pressure on the lower surface of the interface between the slab and the foundation. The obtained formulas ensure both the exact (in the integral sense) satisfaction of the boundary conditions at the edges of the slab, and the logical (in the physical sense) distribution of the contact pressure along the lower surface of the slab, where it is partially in contact with the rigid foundation. The expression for the contact pressure is obtained due to the exact satisfaction of the boundary condition of equality of zero vertical displacement of the lower surface of the slab in the area of its contact with the rigid foundation. The mentioned vertical displacement is written in the form of a polynomial of the fourth order in the transverse coordinate.

A comparison with the corresponding results according to the "sliding" theories of B.F. Vlasov and S.A. Ambartsumyan, obtained a partial case of the developed mathematical model of plates of medium thickness when it is assumed

that the correction from the deformation of transverse compression is equal to zero. It is shown that this type of solution, where the contact pressure at the boundary of a smooth contact takes certain finite (according to "shear" theories) or infinite (according to the classical Kirchhoff theory) values, does not correspond to the physical content of the problem, as well as to the corresponding solutions of spatial problems of the theory of elasticity and it is not desirable to use them. When determining the size of the contact area, as evidenced by the author's previous research in similar problems for short beams, as well as the corresponding results of other authors, they differ only quantitatively.

Ключові слова: уточнена модель плити, поперечний зсув, деформація поперечного обтиснення, поверхня контакту, згин.

Keywords: refined plate model, transverse shear, deformation of transverse compression, contact surface, bending.

Задачі про згин композитних плит на пружних і жорстких основах під дією розподілених та зосереджених навантажень розглядалися багатьма авторами у працях [1-4]. Зокрема, у цих працях проводилися дослідження, які пов'язані з розрахунками ізотропних пластин, побудованих на базі гіпотез Кірхгофа. Пізніше, авторами [5-8]: К. Пистером і Р. Вестманом, С. Лукасевичем, Б.Л. Пелехом та Р.Д. Сысаком, В.В. Безелянским та іншими [9,10], було враховано вплив поправок від деформацій поперечного зсуву, поперечної анізотропії на визначення величин максимальних напружень і переміщень у плитах. В останніх працях подібні задачі розглядалися уже за допомогою більш точних (вищих порядків) розрахункових рівнянь, із урахуванням деформації поперечного обтиснення.

У статті досліджується згин трансверсально-ізотропної плити, частково обпертої на жорсткий фундамент, у постановці уточненої моделі трансропних плит середньої товщини [9,10], розрахункові рівняння якої враховують деформації поперечного зсуву та обтиснення.

Розглядається циліндричний згин трансверсально-ізотропної плити, шириною $2l$, що лежить на жорсткій основі і по краях $x = \pm l$ піднята на певну висоту δ розподіленим уздовж її краю зусиллям P_1 . Плита також знаходиться під дією власної ваги q і невідомого контактного тиску $p(x)$, що виникає між нижньою поверхнею плити та жорстким фундаментом в області її контакту. Приймається, що поверхня розділу плити та жорсткої основи є ідеально гладкою, тому дотичні напруження

τ_{xz}, τ_{yz} на цій поверхні вважатимуться відсутніми. Граничні умови на зовнішніх поверхнях плити для нормальних напружень σ_z записуються наступним чином [9]:

$$\sigma_z = q^+(x) = -p(x) \text{ для } (z = h; |x| \leq a); \quad (1)$$

$$\sigma_z = 0 \text{ для } (z = h; x > a); \quad \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \text{ для } z = \pm h,$$

де $p(x)$ – невідомий контактний тиск; $2h$ – товщина плити.

Розрахункове рівняння уточненої моделі згину плит можна записати у наступному вигляді [10]:

$$D \frac{d^4 w}{dx^4} = (1 - \varepsilon_1 \frac{d^2}{dx^2} - \varepsilon_1 \frac{d^4}{dx^4}) q_2, \quad (2)$$

$$\text{де } D = \frac{2Eh^3}{3(1-\nu^2)}; \quad q_2 = (q^+ + q^-) \varepsilon_1 = \frac{h^2}{10(1-\nu)} \left(8 \frac{G}{G'} - 3\nu'' \right),$$

$$\varepsilon_2 = \frac{0,1h^4}{2(1-\nu^2)} (1 - \nu'' G' / 2G) \cdot \frac{E}{E'}, \quad q^- = q - \text{власна вага плити.}$$

Вираз для вертикального переміщення плити записується у вигляді:

$$W(x, z) = w(x) + \alpha_z z \cdot \frac{q_1}{E'} + A' \cdot \frac{d^2 w}{dx^2} \cdot \frac{z^2}{2} + \frac{\alpha_z q_2 h}{16E'} \cdot B(z). \quad (3)$$

$$\text{Тут } B(z) = 6A_2 \frac{z^2}{h^2} - A_3 \frac{z^4}{h^4}; \quad A' = \frac{\nu''}{1-\nu}; \quad \alpha_z = 1 - 2\nu' A',$$

$$A_2 = 1 + \frac{A'E'}{\alpha_z G'}; \quad A_3 = A_2 - \frac{\nu'' A'E'}{2\alpha_z G'}, \quad q_1 = \frac{1}{2} (q^+ - q^-).$$

Вертикальне переміщення плити в області її контакту з жорсткою основою ($x \leq a$) має дорівнювати нулю: $W(x, h) = 0$. Задовольняючи

цій умові, а також умові (1), одержимо вираз для контактного тиску на нижню поверхню плити:

$$A_0^+ p(x) = w(x) + 0.5A'h^2w'' - A_0^- q, \quad (4)$$

$$\text{де } A_0^\pm = (8 \pm B(h)) \frac{\alpha_z h}{16E'}.$$

Поза областю контакту ($x > a$) нижньої поверхні плити та поверхні розділу вертикальне переміщення плити записується у вигляді:

$$W(x, h) = w(x) + 0.5A' \cdot \frac{d^2 w}{dx^2} h^2 - \frac{\alpha_z h q}{2E'} + \frac{\alpha_z q h}{16E'} (6A_2 - A_3), \quad (5)$$

$$\text{де } B(h) = 6A_2 - A_3.$$

Для визначення переміщень серединної поверхні плити, а також контактний тиск жорсткої основи на пластину (4), скористаємося диференціальним рівнянням (2), яке зводиться до вигляду:

$$w^{IV} - 2g^2 w'' + \lambda^4 w = (A_0^+ + A_0^-) q / D_0, \quad (6)$$

де

$$D_0 = DA_0^+ - (\varepsilon_2 + 0.5A'\varepsilon_1 h^2) = \lambda^{-4}, \quad g^2 = \frac{0.4}{1-\nu} (G/G' - \nu'') h^2 \lambda^4.$$

Із урахуванням симетричності задачі, розв'язком диференціального рівняння (6), за умови, що $g^2 < \lambda^2$, буде наступна формула для переміщення серединної поверхні плити:

$$w(x) = A_1 ch \alpha x \cdot \cos \beta x + A_2 sh \alpha x \cdot \sin \beta x + w^*, \quad (7)$$

де $\alpha = \sqrt{(\lambda^2 + g^2)/2}$; $\beta = \sqrt{(\lambda^2 - g^2)/2}$; $w^* = (A_0^+ + A_0^-) q$ - частковий розв'язок рівняння (6), із урахуванням абсолютної жорсткості фундаменту.

Два коефіцієнти (A_1, A_2) та величина області контакту $2a$ знаходяться з умов, що невідомий контактний тиск $p(x)$ на межі області контакту $x = \pm a$ дорівнює нулю, а всередині області має задовольнити умову рівності нулю суми проєкцій всіх сил на вісь Oz та умову рівності нулю суми моментів проєкцій всіх сил відносно початку системи координат ($x = 0$):

$$p(\pm a) = 0; \int_{-a}^a p(x) dx = 2ql - 2P_1;$$

$$\int_0^a xp(x) dx = \frac{1}{2}ql^2 - P_1l. \quad (8)$$

За отриманими (на основі умов (8)) формулами можна знайти зміну величини області контакту та максимального контактного тиску в зоні області контакту із фундаментом як для плити з ізотропного, так і з трансверсально – ізотропного матеріалів. Останнє дозволить більш точно дослідити впливи поперечної анізотропії на згадані характеристики за рахунок уточнень від ефектів деформацій поперечного обтиснення.

Якщо ж у розрахункових рівняннях (2) - (7) покласти параметри, що враховують вплив деформації поперечного обтиснення, рівними нулю ($\nu'' = 0, E' / E'' = 0$), то отримаємо відповідні рівняння «зсувних» теорій Б.Ф. Власова [11] – С.А. Амбарцумяна [12]. Зокрема, скористаємося виразом для згинального моменту –

$$M(x) = -D \frac{d^2w}{dx^2} - \varepsilon_\tau q_2, \quad \text{де величина } q_2(x) = -\frac{d^2M}{dx^2}.$$

Використавши ці залежності, можна отримати наступне рівняння:

$$D \frac{d^2w}{dx^2} = -M(x) + \varepsilon_\tau \frac{d^2M}{dx^2}, \quad \varepsilon_\tau = \frac{0,8h^2G}{(1-\nu)G'}. \quad (9)$$

Рівняння (9), враховуючи, що у зсувних теоріях переміщення w є сталим по усій товщині плити, описує залежність кривини деформованої поверхні плити та може бути записане у наступному вигляді:

$$\frac{d^2 M}{dx^2} - \rho^2 M = 0, \quad \rho^2 = 1/\varepsilon_\tau. \quad (10)$$

Подібне рівняння виведене В.І. Феодосьєвим [13] в аналогічній задачі для балки (плоский напружений стан), де замість параметра ρ^2 використовується параметр $\rho_\phi^2 = \rho^2 / (1 - \nu^2)$. Ним також допускалося, що для ділянки балки, яка лежить на абсолютно жорсткій основі, кривина її поверхні рівна нулю, тому права частина рівняння (9) може стати розрахунковим рівнянням для визначення як згинального моменту $M(x)$, так і контактної тиску $p(x) = M''(x)$ на нижню поверхню плити.

Розв'язком рівняння (10) буде вираз: $M(x) = C_1 \operatorname{sh} \rho x + C_2 \operatorname{ch} \rho x$, де при $x = 0 - M(0) = 0, C_2 = 0$, а при $x = a -$

$$C_1 = M(a) / \operatorname{sh} \rho a, M(a) = P_1 l (1 - \theta) - 0,5 q l^2 (1 - \theta)^2, \theta = a/l.$$

У результаті отримаємо :

$$M(x) = \left(P_1 l (1 - \theta) - 0,5 q l^2 (1 - \theta)^2 \right) \operatorname{sh} \rho x / \operatorname{sh} \rho a. \quad (11)$$

Для визначення величини області контакту $2a$, на відміну від умов (8), можна отримати трансцендентне рівняння із умови, що узагальнені кути повороту γ_x зліва і справа уздовж лінії $x = a$ мають бути однаковими. Прирівнявши їх, отримаємо трансцендентне рівняння для визначення величину області контакту в плиті без урахування в рівняннях деформації поперечного обтиснення:

$$\gamma_x^{l.}(a) = \gamma_x^{np.}(a). \quad (12)$$

Шуканий кут повороту знаходиться за формулою

$$\gamma_x = \frac{3}{2h^3} \int_{-h}^h U \cdot z dz = -\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{4}{5} \frac{Q_x}{K'}, \quad K' = \frac{4}{3} G'h. \quad (13)$$

Тут $Q(x)$ – поперечна сила у напрямку осі x .

Складові кута повороту γ_x зліва (ділянка плити, що контактує із фундаментом) визначаються наступним чином: похідна від переміщення w у цьому випадку $\frac{\partial w}{\partial x} \equiv 0$ за означенням, а величина

$$Q_x^{nie.} = \frac{dM}{dx} = \rho \left[P_1(1-\theta) - \frac{ql^2}{2}(1-\theta)^2 \right] \frac{ch\rho x}{sh\rho a}. \quad (14)$$

Складові кута повороту γ_x справа:

$$M^{np.}(x) = P_1(l-x) - q(l-x)^2/2, \text{ а } Q_x^{np.}(x) = -P_1 + q(l-x).$$

Тоді, проінтегрувавши рівняння (9), отримаємо:

$$D \frac{dw}{dx} = -\int_l^x (M(x) + \varepsilon_\tau q) dx = P_1(l-x)^2/2 - q(l-x)^3/6 + \varepsilon_\tau q(l-x).$$

Підставивши одержані співвідношення в умову (12), отримаємо трансцендентне рівняння для визначення величини області контакту в плиті без поправки в розрахункових рівняннях деформації поперечного обтиснення:

$$\rho l \left[P_1(1-\theta) - \frac{ql}{2}(1-\theta)^2 \right] \frac{ch\rho l\theta}{sh\rho l\theta} = [-P_1 + ql(1-\theta)] - \rho^2 l^2 \left[P_1(1-\theta)^2/2 - ql(1-\theta)^3/6 + \frac{\varepsilon_\tau}{l^2} ql(1-\theta) \right]. \quad (15)$$

Одночасно, використавши формулу, що $p(x) = M''(x)$ знайдемо величину контактного тиску в плиті:

$$p(x) = \rho^2 \left(P_1(1-\theta) - 0,5ql^2(1-\theta)^2 \right) sh\rho x / sh\rho a. \quad (16)$$

Звідси, при $x=0$, отримаємо, згідно зсувних теорій, що тиск $p(0)=0$, а далі зростає за законом гіперболічного синуса і на межі контакту, при $x=a$, приймає відмінне від нуля значення:

$$p(a) = \rho^2 \left(Rl(1-\theta) - 0,5ql^2(1-\theta)^2 \right). \quad (17)$$

Із останньої формули видно, що контактний тиск на межі області контакту приймає певне скінченне значення, що суперечить фізичному змісту задачі, бо згідно умов на межі області контакту $x = \pm a$ він має дорівнювати нулю. Таке ж (нульове) значення можна отримати і згідно формули (4), де враховується поперечне обтиснення.

Висновки

За допомогою формул уточненої моделі згину трансверсально - ізотропних плит середньої товщини, що ураховує у рівняннях поперечний зсув та обтиснення, розв'язана контактна задача циліндричного згину плити, центральна область якої частково контактує із жорстким фундаментом. Розглянуто також випадок розв'язку цієї задачі, коли у розрахункових рівняннях не враховується деформація поперечного обтиснення. Отриманий у цьому випадку вираз для контактної тиску між жорстким фундаментом та частиною поверхні плити повторює вираз для контактної тиску в ізотропній балці, одержаний В.І. Феодосьєвим. Показано, що такого типу розв'язки не відповідають фізичному змісту задачі і користуватись ними небажано.

References

1. Korenev B.H., Chernyhovskaia E.Y. Raschët plyt na uprugom osnovanyu. M.: Hosstroiyzdat, 1962. 355 s.
2. Ufliand Ya.S. Yntehralnye preobrazovaniya v zadachakh teoryy uprugosti. M.-L.: Yzd.-vo AN SSSR, 1963. 402 s.
3. Tymoshenko S.P., Voinovskiy-Kryher S. Plastynky y obolochky. M.: Fyzmathyz, 1963. 635s.
4. Vlasov V.Z., Leontev N.N. Balky, plastyny y obolochky na uprugom osnovanyu. M.: Hosfyzmatlyt, 1960. 491 s.
5. Pyster K., Vestman R. Yzghyb plastynok na uprugom osnovanyu // Trudy Amer. Ob-va ynzh. mekh. Ser.E. Prykl. mekhanyka. 1962. №2. S.165-171.
6. Lukasevych S. Lokalnye nahruzky v plastynakh y obolochkakh. M.: Myr, 1982. 544s.
7. Pelekh B.L., Sysak R.D. O davleny davleny tverdoho tela transversalno-yzotropnuiu plastynku, svyazannuiu s uprugym osnovanyem // Yzvestiya AN Armianskoi SSR. 1970. T. 23. №3. S. 36-42.
8. Bezelianskiy V.V. Raschet beskonechnoi plyty na uprugom osnovanyu po skheme osesymetrycheskoi zadachy bez hypotezy priamykh normalei // Proektyrovanye y ekspluatatsiya aeroportov. Trudy HosNYU hrazhdanskoi avyatsyy. 1980, № 196. S. 3-7.
9. Piskunov V.H., Shvabiuk V.I. Kontaktna zadacha dlia transversalno-izotropnoi plyty na pruzhnomu pivprostori // Visnyk Ukrainskoho transportnoho universytetu. Kyiv: RVV UTU. 1999. Vyp. 3. S. 218-223.

10. Shvabiuk V.I., Rotko S.V., Shvabiuk V.V. Matematychni modeli deformuvannya kompozytynykh plyt i balok: kontaktna vzaiemodiia iz shtampamy ta osnovamy. Vplyv trishchyn: Monohrafiia. Lutsk: Vezha-Druk, 2022. 804 s.

11. Vlasov B.F. Ob uravneniyakh teoryy yzghyba plastynok // Yzv.AN SSSR, OTN, 1957, № 12. S.57-60.

12. Ambartsumian S.A. Teoriya anizotropnykh plastyn. M.: Nauka, 1987. 360 s.

13. Feodosev V.Y. Yzbrannyye zadachy u voprosy po soprotivleniyu materialov. M.: Nauka, 1973. 400 s.

Список використаної літератури

1. Коренев Б.Г., Черниговская Е.И. Расчёт плит на упругом основании. М.: Госстройиздат, 1962. 355 с.

2. Уфлянд Я.С. Интегральные преобразования в задачах теории упругости. М.-Л.: Изд.-во АН СССР, 1963. 402 с.

3. Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки. М.: Физматгиз, 1963. 635с.

4. Власов В.З., Леонтьев Н.Н. Балки, пластины и оболочки на упругом основании. М.: Госфизматлит, 1960. 491 с.

5. Пистер К., Вестман Р. Изгиб пластинок на упругом основании // Труды Амер. Об-ва инж. мех. Сер.Е. Прикл. механика. 1962. №2. С.165-171.

6. Лукасевич С. Локальные нагрузки в пластинах и оболочках. М.: Мир, 1982. 544с.

7. Пелех Б.Л., Сысак Р.Д. О давлении на твердого тела трансверсально-изотропную пластинку, связанную с упругим основанием // Известия АН Армянской ССР. 1970. Т. 23. №3. С. 36-42.

8. Безелянский В.В. Расчет бесконечной плиты на упругом основании по схеме осесимметрической задачи без гипотезы прямых нормалей // Проектирование и эксплуатация аэропортов. Труды ГосНИИ гражданской авиации. 1980, № 196. С. 3-7.

9. Піскунов В.Г., Шваб'юк В.І. Контактна задача для трансверсально-ізоотропної плити на пружному півпросторі // Вісник Українського транспортного університету. Київ: РВВ УТУ. 1999. Вип. 3. С. 218–223.

10. Шваб'юк В.І., Ротко С.В., Шваб'юк В.В. Математичні моделі деформування композитних плит і балок: контактна взаємодія із штампами та основами. Вплив тріщин: Монографія. Луцьк: Вежа-Друк, 2022. 804 с.

11. Власов Б.Ф. Об уравнениях теории изгиба пластинок // Изв.АН СССР, OTN, 1957, № 12. С.57-60.

12. Амбарцумян С.А. Теория анизотропных пластин. М.: Наука, 1987. 360 с.

13. Феодосьев В.И. Избранные задачи и вопросы по сопротивлению материалов. М.: Наука, 1973. 400 с.

**ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЇ БУДІВНИЦТВА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ
ТА ЕКОЛОГІЧНО ЧИСТИХ ПРОТИОЖЕЛЕДНИХ МАТЕРІАЛІВ
НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ДОРОЖНЬОГО
ПОКРИТТЯ ТА БЕЗПЕКУ ДОРОЖНЬОГО РУХУ**

**THE ROLE OF AUTOMOBILE ROADS CONSTRUCTION
TECHNOLOGY AND ENVIRONMENTALLY CLEAN ANTI-ICE
MATERIALS ON THE OPERATIONAL PROPERTIES OF THE ROAD
SURFACE AND TRAFFIC SAFETY**

**Шимчук О.П., к.т.н., доц., Процюк В.О., к.т.н., доц., Талах Л.О.,
к.т.н., доц., Андрійчук О.В., к.т.н., доц., Корева О.О., магістр,
(Луцький національний технічний університет)**

**Shymchuk O.P., Ph.D. in Engineering, Associate Professor,
Protsiuk V.O., Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Talakh L.O.,
Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Andriichuk O.V., Ph.D. in
Engineering, Associate Professor, Koreva O.O., mahistr (Lutsk National
Technical University)**

У роботі представлено виконання та результати експериментальних досліджень прилипання кам'яного матеріалу до обледенілого дорожнього покриття та встановлено оптимальну температуру нагріву гранітного та базальтового відсіву, за умови різних температур навколишнього середовища.

In the conditions when our country has become a direct neighbor of the European Union, and also aspires to become its full-fledged member, it is necessary to bring the development of all branches of the national economy closer to the European level, first of all, to establish requirements for the use of a wide range of products that would meet European quality standards.

Roads are constantly under load and exposed to the effects of atmospheric phenomena. Climate, meteorological conditions, destructive actions of vehicles are factors that deteriorate the properties of a road as an engineering structure, thereby reducing the efficiency and safety of road traffic.

One of the important factors affecting the safety of road traffic and the speed of movement of road transport is the slipperiness of the surface (low coefficient of adhesion of the car tire to the road surface), which is especially evident in the winter period. As a result, the braking distance increases, the probability of traffic accidents increases.

Important attention should be paid to winter maintenance, as the winter period is quite difficult for the maintenance of roads and the movement of cars, especially in areas with long winters and significant snow deposits.

Winter road maintenance is a complex of measures, including: road protection from avalanches and snowdrifts, snow removal, elimination of winter slipperiness and

fight against ice. Therefore, only the timely implementation of the above-mentioned measures can fully ensure the safe and uninterrupted movement of cars in the winter season.

Therefore, the problem of restoring the roughness of the surface on streets and roads in the winter period is quite urgent. At the same time, an important task is the observance of technologies in the construction of road clothing and the use of environmentally friendly anti-icing materials in the fight against slippery road surfaces.

The paper presents the performance and results of experimental studies of the adhesion of stone material to the icy road surface, and the optimal heating temperature of granite and basalt sifting, under the condition of different ambient temperatures, is established.

Ключові слова: *автомобільна дорога, дорожнє покриття, зимове утримання, слизькість, протиожеледні матеріали, кам'яний матеріал, безпека дорожнього руху.*

Keywords: *road, road surface, winter maintenance, slipperiness, anti-icing materials, stone material, road safety.*

Постановка проблеми. Автомобільна дорога являється цілим комплексом інженерних споруд, які призначені для забезпечення безпечного, зручного (комфортного), безперебійного руху транспортних засобів із заданими швидкостями та ваговими навантаженнями.

Ефективність роботи транспортних засобів багато в чому залежить від стану покриття доріг і вулиць, тому одним із головних завдань їх експлуатації є забезпечення утримання та своєчасного ремонту всього комплексу дорожніх споруд і на такому рівні, щоб не погіршувались техніко-економічні показники роботи автомобільного транспорту. Тому наукове обґрунтування відповідної експлуатації автомобільних доріг, їх утримання та ремонт набуває досить важливого значення для дорожньої галузі України.

Спільна робота автомобілів і доріг є складною взаємопов'язаною системою, у якій нормальна робота транспорту буде залежати від стану покриття дорожнього одягу, а термін його служби багато в чому буде залежати від умов роботи автомобілів.

Для забезпечення нормативних експлуатаційних якостей автомобільних доріг можна виділити наступні види робіт з їх ремонту та утримання: поточний ремонт та експлуатаційне утримання, своєчасне виконання яких створить необхідні умови для безперервного та безпечного руху транспортних засобів із нормативними швидкостями та навантаженнями.

Утриманням автомобільної дороги називаємо комплекс робіт із догляду за проїзною частиною, узбіччями (за розділювальною смугою, за її наявності), укосами, дорожніми спорудами та смугою відведення, із профілактики та усунення незначних пошкоджень, забезпечення безпеки дорожнього руху, а також із зимового утримання та озеленення дороги.

Важливу увагу при цьому варто приділити зимовому утриманню, так як зимовий період досить складний для утримання доріг та руху автомобілів, особливо в районах із затяжною зимою та значними сніговими відкладеннями.

Зимове утримання доріг – це комплекс заходів, серед яких: захист дороги від лавин і снігових заметів, снігоочищення, ліквідація зимової слизькості та боротьба з льодовою кригою. Тому тільки своєчасне проведення вищезазначених заходів повною мірою може забезпечити безпечний та безперебійний рух автомобілів у зимову пору року.

Тому проблема відновлення шорсткості покриття на вулицях і дорогах в зимовий період є досить актуальною. При цьому важливим завданням є дотримання технологій при будівництві дорожнього одягу та використання екологічно чистих протижелезних матеріалів у боротьбі зі слизькістю дорожнього покриття.

Аналіз останніх досліджень. Вирішенням проблем, пов'язаних із зимовою слизькістю покриття автомобільних доріг та міських вулиць, займалися науковці різних країн. У роботі [1] представлено узагальнений аналіз міжнародного досвіду різних країн в боротьбі із зимовою слизькістю та наведено конкретні приклади її усунення і рекомендовані заходи за даними міжнародних конференцій. Екологічним наслідком зимового утримання автомобільних доріг присвячена робота [2]. Можливість боротьби із зимовою слизькістю екологічно чистими протижелезними матеріалами розглядається у роботі [3].

Метою роботи було проведення експериментальних досліджень прилипання кам'яного матеріалу до обледенілого дорожнього покриття та встановлення оптимальної температури нагріву гранітного та базальтового відсіву, за умови різних температур навколишнього середовища.

Результати досліджень. До способів боротьби з обледенінням відносяться: механічний (можна застосовувати для доріг III–V категорій), фізико-хімічний (можна застосовувати для доріг I–II категорій), хімічний (можна застосовувати для доріг I–III категорій) та тепловий.

Найпоширенішим способом боротьби зі слизькістю як в Україні, так і за кордоном є посипка покриття сумішшю піску та технічної солі (NaCl). Проте навіть невелика кількість солей, що накопичується на протязі багатьох років у придорожній смузі, матиме негативний вплив на ріст дерев, зернових культур та інші рослини. У зв'язку з агресивним впливом хлоридів на навколишнє середовище в деяких країнах висловлюються проти застосування хімічних матеріалів для зимового утримання доріг.

У роботі [3] запропоновано використати гранітний відсів, як екологічно чистий матеріал, нагрітий до температури 160-180°C у сушильному барабані, з метою посипання ним обледенілого дорожнього покриття у зимовий період комбінованими дорожніми машинами. Проте, в

даній роботі не розглядалася поведінка даного матеріалу на покритті, зокрема, зчеплення гранітного відсіву зі слизьким дорожнім одягом.

У зв'язку з цим у науково-дослідній лабораторії кафедри будівництва та цивільної інженерії Луцького національного технічного університету проводились експериментальні дослідження прилипання кам'яного матеріалу до обледенілого дорожнього покриття.

Для досліджень використовувалась імітація обледенілого дорожнього покриття, базальтовий та гранітний відсів, який нагрітий до певної температури.

Для створення імітації обледенілого дорожнього покриття використовувались пластикові лотки, в яких заморозували воду до утворення льоду в морозильній камері.

Гранітний та базальтовий відсів нагрівали в муфельній печі до температури 160, 180 та 200°C (рис. 1). Подальше нагрівання кам'яного матеріалу вважаємо недоцільним, оскільки при температурах, більших за 200°C, він може покриватися водою, що утворюється в результаті танення льоду.



Рис. 1 Нагрівання кам'яного матеріалу

Контроль за температурою нагрівання гранітного та базальтового відсіву проводили при допомозі спеціального термометра (рис. 2).



Рис. 2 Вимірювання температури кам'яного матеріалу

Для забезпечення умов, максимально наближених до реальних при проведенні експериментальних досліджень, лотки з льодом розмістили на вулиці та посипали, нагрітим до відповідної температури гарячим гранітним і базальтовим відсівом із нормою витрати $0,15\text{ м}^3$ на 1000 м^2 дорожнього покриття, згідно з [4] (рис. 3).



Рис. 3 Посипання імітованого обледенілого дорожнього одягу гарячим гранітним і базальтовим відсівом

Під час взаємодії імітованого дорожнього покриття з нагрітим до відповідної температури гарячим гранітним і базальтовим відсівом частина тепла затрачається на танення льоду. В момент, коли температура

досягає 0°C , відбувається прилипання кам'яного матеріалу до поверхні обледенілого дорожнього покриття (рис.4).



Рис. 4 Прилипання кам'яного матеріалу до поверхні обледенілого дорожнього покриття

Експериментальні дослідження проводили за температури навколишнього середовища -3 , -5 та -7°C у трьохкратній повторюваності для кожної з температур і, як результат, приймали середньоарифметичне значення. Результат досліду вказує на те, що при температурі навколишнього середовища -7°C гранітний і базальтовий відсів достатньо нагріти до температури 180°C .

Висновок. На основі отриманих результатів можна стверджувати, що за допомогою використання гранітного чи базальтового відсіву, який нагрітий до температури 160 - 200°C , можна підвищити шорсткість обледенілого дорожнього одягу в зимовий період, не завдавши негативного впливу навколишньому природному середовищу. При цьому відсутня потреба у використанні нової спеціальної техніки та спеціального обладнання.

References

1. Kaskiv V.I., candidate technical of Science, Assoc., Pivtoratskyi D.S., Bidnenko N.A., Dubova O.A. Generalization of international experience in the fight against winter

slippery conditions / "Roads and bridges". Collection of scientific works. – 2021. – Issue 23. - p. 225-236.

2. Vyrozhemskiy V.K., Borodina N.A., Truh M.E. Ecological consequences of winter maintenance of highways / Highway of Ukraine. - 2006. - No. 2 - p. 35-38.

3. Shymchuk O.P. Impact of anti-icing materials for winter road maintenance on the environment and road safety / O.P. Shymchuk // Town planning and territorial planning. Scientific and technical collection. - K., KNUBA, 2014. Issue No. 54, p. 486-490.

4. PG.1-218-118:2005 Uniform rules for winter road maintenance. Ukrdortekhnologiya. – Kyiv-Kharkiv, 2005.

5. DSTU B V.2.7-30:2013 Non-mineral materials for crushed stone and gravel foundations and road surfaces. General technical conditions. - Kyiv: Ministry of Regional Construction of Ukraine - 2013. - (National Standard of Ukraine).

6. DBN V.2.3-5:2018. Streets and roads of settlements. - K.: Ministry of Regions of Ukraine, 2018. - 55 p.

7. DBN B.2.3-4:2015. Transport facilities. Automobile roads. - Kyiv.: Ministry of Regional Construction of Ukraine - 2015. - 104 p. – (National Standard of Ukraine).

Список використаної літератури

1. Каськів В. І., канд. техн. наук, доц., Півторацький Д. С., Бідненко Н. А., Дубова О. А. Узагальнення міжнародного досвіду в боротьбі із зимовою слизькістю /«Дороги і мости». Збірник наукових праць. – 2021. – Вип. 23. – с. 225-236.

2. Вирожемський В.К., Бородіна Н.А., Трух М.Є. Екологічні наслідки зимового утримання автомобільних доріг /Автошляховик України. – 2006. – №2 – с. 35-38.

3. Шимчук О.П. Вплив протиожеледних матеріалів для зимового утримання доріг на навколишнє середовище та безпеку дорожнього руху / О.П. Шимчук// Містобудування та територіальне планування. Науково-технічний збірник. – К., КНУБА, 2014. Випуск № 54, с. 486-490.

4. ПГ.1-218-118:2005 Єдині правила зимового утримання автомобільних доріг. Укрдортехнологія. – Київ-Харків, 2005.

5. ДСТУ Б В.2.7-30:2013 Матеріали нерудні для щелебених і гравійних основ та покриттів автомобільних доріг. Загальні технічні умови. – Київ: Мінрегіонбуд України – 2013. – (Національний стандарт України).

6. ДБН В.2.3-5:2018. Вулиці та дороги населених пунктів. – К.: Мінрегіон України, 2018. – 55 с.

7. ДБН В.2.3-4:2015. Споруди транспорту. Автомобільні дороги. – Київ.: Мінрегіонбуд України – 2015. – 104 с. – (Національний стандарт України).

ТЕОРЕТИЧНЕ ОЦІНЮВАННЯ МІЦНОСТІ ПЕТ-ФІБРОБЕТОНУ
НА РОЗТЯГ

THEORETICAL EVALUATION OF THE TENSILE STRENGTH OF
PET FIBROCONCRETE

Шмиг Р.А., к. т. н., доцент, Білозір В.В, аспірант (Львівський національний університет природокористування) ORCID 0000-0003-1926-9520

Shmyh R., PhD, Associate Professor (Lviv National Environmental University), Bilozir V., PhD student (Lviv National Environmental University)

Виконано експериментальні дослідження зчеплення ПЕТ-фібри поперечним перерізом 3 x 0,2 мм з дрібнозернистим бетоном класів C20/25, C25/30 і C30/35 за довжин закладання фібри 10, 15 і 20 мм. За результатами експериментів з витягування ПЕТ-фібри з торців призм розмірами 100 x 50 x 50 мм визначено коефіцієнт, що враховує анкерування фібри η_f . Використання цього коефіцієнта у відповідних формулах дозволило спрогнозувати міцність ПЕТ-фібробетону на розтяг.

By calculating the bearing capacity of the elements of PET-fiber concrete structures, it is necessary to determine the tensile strength of this material. There are two cases of tensile failure of fiber concrete. In the first case, part of the fiber is torn, and part is pulled out, and in the second - the entire fiber is pulled out. If the required fiber anchoring length is less than half its length, then the first case of tensile failure of fiber concrete is realized, and if this condition is not fulfilled, then the second case is realized. The required length of anchoring l_{fb} depends on the coefficient that takes into account the anchoring of the fiber η_f , so its experimentally justified purpose is important, since it will affect the correctness of the calculation of both the tensile strength of PET- fiber concrete and the bearing capacity of elements made of this material. In this regard, experimental studies of the adhesion of PET fiber to fine-grained concrete were performed and recommendations were developed for calculating the tensile strength of PET-fiber concrete.

The research program involved the production and tensile testing of a PET- fiber with a cross-section of 3 x 0,2 mm, embedded in the end of a 100 x 50 x 50 mm prism with a length of 10, 15 and 20 mm. For each of the classes of concrete (C20/25, C25/30 and C30/35) and each fiber laying length, 6 twin samples were manufactured and tested. Thus, a total of 54 samples were tested.

According to the results of experiments on pulling PET- fiber from concrete prisms, a coefficient that takes into account the anchoring of the fiber η_f , which is equal to 1,25, was determined. Determination of the length of PET- fiber is substantiated, taking into

account the results of tensile tests. It is recommended to appoint a fiber with dimensions of 40 x 3 x 0,2 mm. It is proposed to calculate the tensile strength of PET- fiber concrete by analogy with steel fiber concrete. The corresponding formula can be used to preliminarily estimate the tensile strength of PET fiber concrete, and then refine it after testing PET- fiber concrete tensile samples. It is shown that the tensile strength of PET fiber concrete with a fiber reinforcement ratio of 0,02 is lower than the strength of concrete. Therefore, it is impractical to use PET- fiber concrete in stretched elements, unlike bent ones.

Ключові слова: ПЕТ-фібра, дрібнозернистий бетон, зчеплення, міцність, розтяг, розрахунок.

Key words: PET-fiber, fine-grained concrete, adhesion, strength, tension, calculation.

Постановка проблеми. Для розрахунку несучої здатності елементів ПЕТ-фібробетонних конструкцій необхідно, як і для сталевіфробетонних конструкцій, спочатку визначити міцність цього матеріалу на розтяг [1]. При цьому до уваги треба брати те, що можливими є два випадки руйнування фібробетону за розтягу [2]. У першому випадку частина фібр розривається, а частина висмикується, а в другому – вся фібра висмикується. Якщо необхідна довжина анкерування фібри менша за її пів довжини ($l_{fb} \leq l_f / 2$), то реалізується перший випадок руйнування фібробетону за розтягу, а якщо ця умова не виконується, то реалізується другий випадок. Необхідна довжина анкерування l_{fb} залежить від коефіцієнта, що враховує анкерування фібри η_f , тому його експериментально обґрунтоване призначення є важливим, оскільки це впливатиме на коректність розрахунку як міцності ПЕТ-фібробетону на розтяг, так і несучої здатності елементів з цього матеріалу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження зчеплення сталеві фібри з дрібнозернистим бетоном [3 – 6] свідчать, що на максимальні зусилля при витягуванні фібр діаметром d_f з дрібнозернистого бетону впливають довжина закладання фібри l_e , призмова міцність бетону $f_{c,prism}$ і коефіцієнт η_f . Врахування вказаних параметрів у розрахунках дозволило розвинути деформаційний метод розрахунку згинаних сталевіфробетонних елементів [7 – 10].

Зарубіжні дослідження ПЕТ-фібробетону [11 – 18] свідчать про те, що об'ємний вміст ПЕТ-фібри впливає на міцнісні властивості бетону, однак за низьких її витрат силовий ефект не спостерігається, тоді як завжди відмічається в'язкість руйнування згинаних і стиснутих елементів.

У працях [19 – 21] подано результати експериментально-теоретичних досліджень ПЕТ-фіробетону, де акцентується увага на необхідності обґрунтованого призначення геометричних розмірів ПЕТ-фібри і її вмісту в об'ємі фіробетону.

Постановка завдання. Наше завдання – виконати експериментальні дослідження зчеплення ПЕТ-фібри з дрібнозернистим бетоном та розробити рекомендації щодо розрахунку міцності ПЕТ-фіробетону на розтяг.

Виклад основного матеріалу. Для того, щоб реалізувався перший випадок руйнування сталевіробетону за розтягу [1], необхідне виконання умови:

$$l_{fb} \geq \frac{\eta_f d_f f_{fk}}{f_{ck}}, \quad (1)$$

де f_{fk} – характеристичне значення міцності фібри на розтяг;

f_{ck} – характеристичне значення міцності бетону на стиск.

Для визначення коефіцієнта η_f були виготовлені у формі (Рис.1) призми 100 x 50 x 50 мм (Рис.2), у торці яких закладалася ПЕТ-фібра поперечним перерізом 3 x 0,2 мм на довжину 10, 15 і 20 мм.



Рис.1. Форма для виготовлення дослідних зразків-призм



Рис. 2. Дослідні зразки-призми 100 x 50 x 50 мм зі закладеною ПЕТ-фіброю у їх торці

Програмою досліджень передбачено виготовлення та випробування на витягування ПЕТ-фібри поперечним перерізом 3 x 0,2 мм, закладеної в торці призми 100 x 50 x 50 мм на довжину 10, 15 і 20 мм. Для кожного з класів бетону (С20/25, С25/30 і С30/35) і кожної довжини закладання фібри виготовлено і випробувано по 6 зразків-близнюків. Таким чином, всього випробувано 54 зразки.

Для виготовлення зразків використано цемент ПрАТ "Івано-Франківськцемент" марок М400 і М500 активністю 42,3 МПа і 53,1 МПа відповідно, пісок Ясинецького кар'єру з модулем крупності 2,1. Склади бетону подані в таблиці 1.

Таблиця 1

Клас бетону	Витрати матеріалів з розрахунку на 1 м ³ суміші			
	Цемент, кг	Марка цементу	Пісок, кг	Вода, л
С20/25	444,5	М400	1644,4	239,2
С25/30	442,6	М500	1604,5	243,4
С30/35	433,2	М500	1724,3	215,6

Суміш готували у бетонозмішувачі, після чого вкладали її у форму з попередньо закладеною фіброю в прорізи цієї форми. Одночасно з шістьма зразками кожної серії виготовляли по три куби 150 x 150 x 150 мм і по три

призми 100 x 100 x 400 мм. Після ущільнення суміші зразків на вібростолі їх зберігали протягом 28 діб за температури 18 – 20 градусів під шапрм вологих опилок.

Випробовували на витягування ПЕТ-фібру зі зразків на розривній машині Р – 0.5 за швидкості навантаження 0,05 мм/с (Рис 3).



Рис 3. Випробування на витягування ПЕТ-фібри з бетонної призми 100 x 50 x 50 мм

Випробування кубів і призм з дрібнозернистого бетону на стиск дозволили отримати такі середні показники міцності: для дрібнозернистого бетону класу C20/25 – $f_{cm,cube} = 28,79$ МПа , $f_{cm,prism} = 23,28$ МПа ; класу C25/30 – $f_{cm,cube} = 34,54$ МПа , $f_{cm,prism} = 27,29$ МПа ; класу C30/35 – $f_{cm,cube} = 39,11$ МПа , $f_{cm,prism} = 31,29$ МПа.

Результати випробувань на витягування фібр з бетонних призм подані в таблицях 2 – 4. При довжині закладання фібри 10 мм у призми з міцністю $f_{cm,prism} = 23,28$ МПа максимальні напруження при витягуванні дорівнювали 86,67 - 93,33 МПа (середнє значення – 90,00 МПа). При такій же довжині закладання фібри у бетон призм з міцністю

$f_{cm,prism} = 27,29$ МПа ці напруження дорівнювали 101,67 – 108,33 МПа (середнє значення – 106,39 МПа). При витягуванні ПЕТ-фібри за довжини закладання 10 мм у призми з міцністю $f_{cm,prism} = 31,29$ МПа максимальні напруження дорівнювали 121,67 – 126,67 МПа (середнє значення – 123,61 МПа).

При довжині закладання фібри 15 мм у призми з міцністю бетону $f_{cm,prism} = 23,28$ МПа максимальні напруження при витягуванні дорівнювали 135,00 - 140,00 МПа (середнє значення – 136,94 МПа).

За довжини закладання фібри 20 мм у призми з бетону класу С20/25 і довжин закладання 15 мм і 20 мм у призми з бетону класів С25/30 і С30/35 фібра найчастіше розривалася при напруженнях 160,00 – 163,33 МПа, що добре кореспондується з експериментальними даними, відображеними у працях [17, 18]. Лише з двох призм із бетону класу С20/25 за довжини закладання 20 мм фібра витягнулася, а не розірвалася при напруженнях 158,33 і 160,00 МПа відповідно.

Еквівалентний діаметр фібри прямокутного перерізу $d_f = 2,038$ мм

у формулі (1) визначали з рівності периметрів круглого стрижня і прямокутного перерізу ПЕТ-фібри:

$$\pi d_f = 2(b_f + \delta_f), \quad (2)$$

де b_f – ширина поперечного перерізу фібри (3 мм);

δ_f – товщина фібри, що дорівнює в середньому 0,2 мм.

За результатами, поданими в таблицях 2 – 4, побудували графік в осях « $\frac{l_e}{d} - \frac{\sigma_f}{f_{c,prism}}$ » (Рис. 4). Це дозволило визначити коефіцієнт що враховує

анкерування фібри η_f , який для даної ПЕТ-фібри дорівнює 1,25.

Таблиця 2
Результати випробувань на витягування ПЕТ-фібри з бетонних призм
(клас бетону C20/25)

Призмova міцність зразків $f_{cm,prism}$	Довжина закладання фібри у бетон l_e , мм	Площа поперечного перерізу фібри A_f , мм ²	Витягуюче зусилля N , Н	Максимальне напруження у фібри при витягуванні чи розриві σ_f , МПа
23,28	10	0,6	55	91,67
			54	90,00
			54	90,00
			53	88,33
			52	86,67
			56	93,33
	15		82	136,67
			83	138,33
			81	135,00
			84	140,00
			81	135,00
			82	136,67
	20		95	158,33
			96	160,00
			97	161,67
			97	161,67
			96	160,00
			98	163,33

Таким чином, використавши значення цього коефіцієнта можна визначити необхідну довжину анкерування фібри l_{fb} для кожного з прийнятих класів бетону і призначити оптимальну довжину фібри l_f такою, що в чотири рази більша за l_{fb} , оскільки середня довжина закладання фібри у фронті тріщини дорівнює чверті її довжини, Результати розрахунків l_{fb} і l_f подані в таблиці 5. Характеристичне значення міцності ПЕТ-фібри прийняте 80 МПа і обґрунтоване у праці [19].

Таблиця 3
Результати випробувань на витягування ПЕТ-фібри з бетонних призм
(клас бетону С25/30)

Призмova міцність зразків $f_{cm,prism}$	Довжина закладання фібри у бетон l_e , мм	Площа поперечного перерізу фібри A_f , мм ²	Витягуюче зусилля N , Н	Максимальне напруження у фібри при витягуванні чи розриві σ_f , МПа
27,29	10	0,6	64	106,67
			66	110,00
			65	108,33
			61	101,67
			63	105,00
			64	106,67
	15		96	160,00
			95	158,33
			97	161,67
			98	163,33
			95	158,33
			96	160,00
	20		97	161,67
			96	160,00
			98	163,33
			97	161,67
			97	161,67
			95	158,33

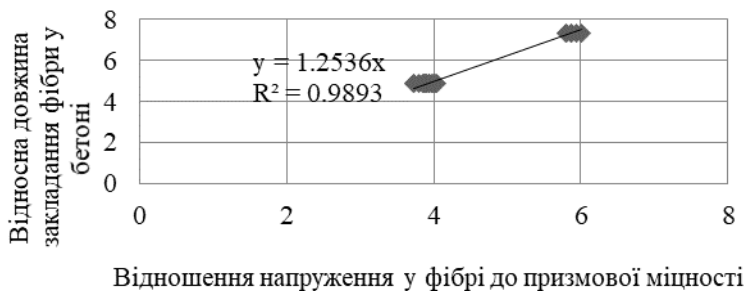


Рис. 4. До визначення коефіцієнта, що враховує анкерування фібри η_f

Таблиця 4
Результати випробувань на витягування ПЕТ-фібри з бетонних призм
(клас бетону С30/35)

Призмova міцність зразків $f_{cm,prism}$	Довжина закладання фібри у бетон l_e , мм	Площа поперечного перерізу фібри A_f , мм ²	Витягуюче зусилля N , Н	Максимальне напруження у фібри при витягуванні чи розриві σ_f , МПа
31,29	10	0,6	74	123,33
			73	121,67
			73	121,67
			74	123,33
			76	126,67
			75	125,00
	15		97	161,67
			98	163,33
			95	158,33
			96	160,00
			96	160,00
			95	158,33
	20		96	160,00
			97	161,67
			96	160,00
			98	163,33
			97	161,67
			95	158,33

Таблиця 5
Результати розрахунку теоретичної оптимальної довжини фібри

f_{ck} , МПа	f_{fk} , МПа	δ_f , мм	η_f	l_{fb} , мм	l_f , мм
20	80	2,038	1,25	10,19	40,76
25				8,15	32,61
30				6,79	27,17

Доцільним було б призначення довжини фібри, однакової для розглядуваних класів бетону. Тому пропонується приймати розміри фібри: 40 x 3 x 0,2 мм.

Міцність фібробетону на розтяг можна визначити за аналогічною формулою норм проектування сталевібробетонних конструкцій [1], в яку можуть бути внесені уточнення після випробувань центрально розтягнутих ПЕТ-фібробетонних елементів:

$$f_{fct} = k_{or}^2 \left(1 - \frac{l_{fb}}{l_f} \right) \rho_{fv} f_{fk}, \quad (3)$$

де k_{or} – коефіцієнт, що враховує орієнтацію фібр в об'ємі елемента залежно від співвідношення розмірів перерізу елемента і довжини фібри [1];

ρ_{fv} – коефіцієнт фібрового армування за об'ємом.

Результати розрахунку міцності на розтяг ПЕТ-фібробетону при коефіцієнті фібрового армування за об'ємом 0,02 і коефіцієнті орієнтації фібр 0,72 подані в таблиці 6.

Таблиця 6
Теоретичне оцінювання міцності ПЕТ-фібробетону на розтяг

f_{ck} , МПа	l_{fb} , мм	l_f , мм	ρ_{fv}	f_{fk} , МПа	k_{or}	f_{fct} , МПа
20	10,19	40	0,02	80	0,72	0,62
25	8,15					0,66
30	6,79					0,69

Результати, подані в таблиці 6, свідчать, що міцність ПЕТ-фібробетону на розтяг є суттєво меншою за міцність бетону на розтяг відповідних класів. Тому у розтягнутих елементах ПЕТ-фібробетон використовувати недоцільно навіть за великих витрат фібри. Слід зауважити, що результати наших експериментально-теоретичних досліджень [19 – 21] свідчать, що ПЕТ-фіброве армування є доцільним у

згинаних елементах, міцність на згин яких суттєво більша за згинальну міцність бетонних елементів.

Висновки

1. За результатами експериментів на витягування ПЕТ-фібри з бетонних призм визначено коефіцієнт, що враховує анкеровання фібри η_f , який дорівнює 1,25.

2. Обґрунтовано призначення довжини ПЕТ-фібри з урахуванням результатів випробувань на витягування.

3. Запропоновано міцність на розтяг ПЕТ-фібробетону обчислювати за аналогією зі сталевібробетоном і уточнити відповідну формулу після випробувань ПЕТ-фібробетонних розтягнутих зразків.

4. Показано, що міцність на розтяг ПЕТ-фібробетону при коефіцієнті фібрового армування за об'ємом 0,02 є меншою за міцність бетону. Тому в розтягнутих елементах, на відміну від згинаних, ПЕТ-фібробетон використовувати недоцільно.

References

1. DSTU-N B V.2.6-218:2016 Guidelines for the design and manufacture of structures from dispersed reinforced concrete. Kyiv: SE "UkrNDNC", 2017. 32 p. [Effective from 2017.04.01].

2. Rabinovich F.N. Dispersion-reinforced concretes. Moscow: Stroyizdat, 1989. 174 p.

3. Bilozir V.V. Formation and opening of cracks in normal sections of bent steel-fiber-concrete elements on a fiber from a sheet: diss ... cand. tech. Sciences. Moscow, 1991. 164 p.

4. Bilosir W., Krapfenbauer R., Bölskey E. Festigkeit und Rissfestigkeit der Stahlfaserbetonbiegeelemente mit Fasern aus Blechabfällen. *Österreichische Ingenieur- und Architekten- Zeitschrift*. 1995. Jg.140. Nr. 2. S. 38 – 53.

5. Bilozir V., Vysochenko A. Determination of the required length of fiber anchoring in concrete. Bulletin of the Lviv National Agrarian University. Ser. Architecture and agricultural construction. 2013. № 14. P. 64-70.

6. Kinash R., Bilozir V., Bidenko I. Theoretical evaluation of tensile strength of concrete reinforced with steel fiber with bent ends. Bulletin of the Lviv National Agrarian University. Ser. Architecture and agricultural construction. 2021. № 22. P. 17-22.

7. Bilozir V. V. Deformation method of calculation of flexural steel-reinforced concrete elements. Bulletin of the Lviv Polytechnic National University. Ser. Theory and practice of construction. 2012. № 742. P. 18-24. 8. Kinash R., Bilozir V. Deformational calculation method of bearing capability of fiber-concrete steel bending elements. *Czasopismo Techniczne* (Technical Transactions: Architecture), 2014. I. 8- A (15). № 111. P. 49 – 58.

9. Kinasz R., Bilozir V., Shmyh R., Vysochenko A. Suspsensibility of Steel Fibre Reinforce d Concrete Values with External Ribbed Armature. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019. Vol. 471 (5). 052047.
10. Kinasz R., Bilozir V., Shmyh R., Bidenko I. Deformability of Steel-Fiber Beams with External Tape Reinforcement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020. Vol. 960 (2). 022046.
11. Ochi T., Okubo S., Fukui K. Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber. *Cement and Concrete Composites*. 2007. № 29. P. 448-455.
12. Won J. P., Jang C. I., Lee S. W., [et all] Long-term performance of recycled PET fibre-reinforced cement composites. *Construction and Building Materials*. 2009. № 24. P. 660 – 665.
13. Kim S. B., Yi N. H., Kim H. Y., Kim J.H.J., Song Y.Ch. Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2010. № 32. P. 232 – 240.
14. Kim J., Park C., Lee S. Effects of the geometry of recycled PET fibre reinforcement on shrinkage cracking of cement-based composites. *Composites*. 2008. № 39. P. 442–450.
15. Pacheco-Torgal F., Ding Y., Jalali S. Properties and durability of concrete containing polymeric wastes (tyre rubber and polyethylene terephthalate bottles): An overview. *Construction and Building Materials*. 2012. № 30. P. 714 – 724.
16. Zhi Ge, Renjuan Sun, Kun Zhang, Zhili Gao, Pengcheng Li. Physical and mechanical properties of mortar using waste Polyethylene Terephthalate bottles. *Construction and Building Materials*. 2013. № 44. P. 81 – 86.
17. Foti D. Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles PET fibers. *Construction and Building Materials*. 2011. № 25. P. 1906 – 1915.
18. Foti D. Use of recycled waste pet bottles fibers for the reinforcement of concrete. *Construction and Building Materials*. 2013. № 96. P. 396 – 404.
19. Bilozir V., Bilozir V. Justification of the parameters of fiber reinforcement from used polyethylene terephthalate. *Bulletin of the Lviv National Agrarian University. Ser. Architecture and agricultural construction*. 2016. № 17. P. 66-71.
20. Shmyh R., Bilozir V., Vysochenko A., Bilozir V. Carrying capacity of bending concrete elements reinforced by fibro and stripes taken from used polyethylene terephthalate bottles. *International Scientific and Practical Conference World science*, 2018. № 2 (30). Vol. 1. pp. 88 – 93.
21. Kinasz R., Bilozir V., Shmyh R., Bilozir V., Bidenko I. Examination of Concrete Elements Bending Strength Reinforced by Polyethylene Terephthalate (PET) Waste. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019. Vol. 603. 042041

Список використаної літератури

1. ДСТУ-Н Б В.2.6-218:2016 Настанова з проектування та виготовлення конструкцій з дисперсноармованого бетону. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017. 32 с. [Чинний з 2017.04.01].
2. Рабинович Ф. Н. Дисперсно армированные бетоны. Москва: Стройиздат, 1989. 174 с.
3. Билозир В. В. Образование и раскрытие трещин в нормальных сечениях изгибаемых сталефибробетонных элементов на фибре из листа: дис... канд. техн. наук. Москва, 1991. 164 с.
4. Bilosir W., Krapfenbauer R., Bölskey E. Festigkeit und Rissfestigkeit der Stahlfaserbetonbiegeelemente mit Fasern aus Blechabfällen. *Österreichische Ingenieur- und Architekten- Zeitschrift*. 1995. Jg.140. Nr. 2. S. 38 – 53.
5. Білозір В., Височенко А. Визначення необхідної довжини анкерування фібри в бетоні. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Сер. Архітектура і сільськогосподарське будівництво*. 2013. № 14. С. 64 – 70.
6. Кінаш Р., Білозір В., Біденко І. Теоретичне оцінювання міцності на розтяг бетону, армованого сталеву фібрую зі загнутими кінцями. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Сер. Архітектура і сільськогосподарське будівництво*. 2021. № 22. С. 17 – 22.
7. Білозір В. В. Деформаційний метод розрахунку згинальних сталефибробетонних елементів. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Сер. Теорія і практика будівництва*. 2012. № 742. С. 18 – 24.
8. Kinash R., Bilozir V. Deformational calculation method of bearing capability of fiber-concrete steel bending elements. *Czasopismo Techniczne (Technical Transactions: Architecture)*, 2014. I. 8- A (15). № 111. P. 49 – 58.
9. Kinasz R., Bilozir V., Shmyh R., Vysochenko A. Suspensibility of Steel Fibre Reinforce d Concrete Values with External Ribbed Armature. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019. Vol. 471 (5). 052047.
10. Kinasz R., Bilozir V., Shmyh R., Bidenko I. Deformability of Steel-Fiber Beams with External Tape Reinforcement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020. Vol. 960 (2). 022046.
11. Ochi T., Okubo S., Fukui K. Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber. *Cement and Concrete Composites*. 2007. № 29. P. 448-455.
12. Won J. P., Jang C. I., Lee S. W., [et all] Long-term performance of recycled PET fibre-reinforced cement composites. *Construction and Building Materials*. 2009. № 24. P. 660 – 665.
13. Kim S. B., Yi N. H., Kim H. Y., Kim J.H.J., Song Y.Ch. Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2010. № 32. P. 232 – 240.

14. Kim J., Park C., Lee S. Effects of the geometry of recycled PET fibre reinforcement on shrinkage cracking of cement-based composites. *Composites*. 2008. № 39. P. 442–450.
15. Pacheco-Torgal F., Ding Y., Jalali S. Properties and durability of concrete containing polymeric wastes (tyre rubber and polyethylene terephthalate bottles): An overview. *Construction and Building Materials*. 2012. № 30. P. 714 – 724.
16. Zhi Ge, Renjuan Sun, Kun Zhang, Zhili Gao, Pengcheng Li. Physical and mechanical properties of mortar using waste Polyethylene Terephthalate bottles. *Construction and Building Materials*. 2013. № 44. P. 81 – 86.
17. Foti D. Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles PET fibers. *Construction and Building Materials*. 2011. № 25. P. 1906 – 1915.
18. Foti D. Use of recycled waste pet bottles fibers for the reinforcement of concrete. *Construction and Building Materials*. 2013. № 96. P. 396 – 404.
19. Білозір В., Білозір В. Обґрунтування параметрів фібрового армування з використаного поліетилентерефталату. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Сер. Архітектура і сільськогосподарське будівництво*. 2016. № 17. С. 66 – 71.
20. Shmyh R., Bilozir V., Vysochenko A., Bilozir V. Carrying capacity of bending concrete elements reinforced by fibro and stripes taken from used polyethylene terephthalate bottles. *International Scientific and Practical Conference World science*, 2018. № 2 (30). Vol. 1. pp. 88 – 93.
21. Kinasz R., Bilozir V., Shmyh R., Bilozir V., Bidenko I. Examination of Concrete Elements Bending Strength Reinforced by Polyethylene Terephthalate (PET) Waste. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019. Vol. 603. 042041.

З М І С Т

Абрамюк І.Г., Казмірук Ю.Й.	Світлові інсталяції як спосіб формування образу простору міста..... 3
Агаєва О.А., Сьоміна Ю.А., Постернак О.О.	Експериментально-статистичні моделі для прогнозування надійності та несучої здатності нормальних перерізів попередньо напружених залізобетонних балок..... 12
Білозір В.В., Мазурак Р.А.	Зчеплення стрижневої арматури класу А500С зі сталевібробетоном зразків балкового типу..... 22
Бондарський О.Г., Ужегова О.А.	Моделювання та дослідження термопружного стану тришарової складеної оболонки 34
Верешко О.В., Мельник Ю.А., Гомон С. С.	Використання морфологічного підходу при розробці концепції розвитку історичної частини м. Луцька..... 40
Заякін Д.К., Делявський М.В., Мікуліч О.А.	Аналіз експлуатаційних властивостей та особливостей застосування геопіни.....46
Ксьоншкевич Л.М., Крантовська О.М., Синій С.В., Сунак П.О., Орешкович Магіа, Ксьоншкевич А.С.	Модифіковані високоміцні бетони для реконструкції інженерних споруд та мереж, доріг..... 52
Мещерякова О.М., Ясній В.П.	ВІМ: ефективний інструмент для реконструкції будівель та споруд..... 61
Мосійчук І.В., Ужегова О.А., Ротко С.В., Синій С.В., Пахолук О.А.	Застосування теплових насосів у системах опалення і гарячого водопостачання на прикладі м. Луцька..... 71

Онищенко А.М., Гібаленко О.М., Чиженко Н.П., Карнаков І.А.	Інженерно-технічне забезпечення діагностики корозійного стану під час реконструкції мостових споруд 81
Пиріг Я.І., Галкін А.В.	Особливості впливу адгезійних добавок на бітуми різного структурно-реологічного типу..... 89
Пічугін С.Ф.	Тенденції розвитку норм вітрового навантаження на будівельні конструкції..... 98
Процюк В.О., Шимчук О.П., Талах Л.О., Богданович О.О.	Застосування металевих конструкцій в автомобільних дорогах..... 117
Rotko S.V., Korin` T.V., Manuel Teixeira Braz César	Gabion retaining walls: features of calculation and design..... 127
Сєдов А.В., Фоменко О.О.	Підвищення ефективності застосування протижелезних реагентів при зимовому утриманні атомобільних доріг..... 138
Сунак П.О., Синій С.В., Мельник Ю.А., Ксьоншкевич Л.М., Крантовська О.М., Орешкович Матіа	Реконструкція інженерних споруд та мереж, ландшафту на основі технології лазерного сканування..... 147
Уль А.В., Мельник О.В., Мельник Ю.А., Мельничук М.М.	Дистанційний моніторинг урбанізованих територій..... 162
Фоменко О.О., Сєдов А.В.	Використання зольних відходів при будівництві грунтових основ автомобільних доріг..... 174

Шваб'юк В.І., Ротко С.В., Шваб'юк В.В., Бондарський О.Г., Ужегова О.А.	Циліндричний згин трансверсально-ізотропної плити, частково опертої на жорсткий фундамент..... 183
Шимчук О.П., Процюк В.О., Талах Л.О., Андрійчук О.В., Корева О.О.	Вплив технології будівництва автомобільних доріг та екологічно чистих протиожеледних матеріалів на експлуатаційні властивості дорожнього покриття та безпеку дорожнього руху..... 192
Шмиг Р.А., Білозір В.В.	Теоретичне оцінювання міцності ПЕТ- фібробетону на розтяг 199

Наукове видання

Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві

Збірник наукових праць

Випуск 18

Верстка С.В. Ротко

Редактор В.І. Шваб'юк

Підписано до друку 27 грудня 2022 р. Формат 60 × 84 1/16.
Папір офсетний

Гарнітура Times New Roman. Друк трафаретний.
Умовн.друк.арк. 12,9. Тираж 100 пр. Зам. №___

Відділ іміджу та промоції Луцького національного технічного
університету, 43018, м. Луцьк, вул. Львівська, 75

Друк – відділ іміджу та промоції Луцького НТУ