

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Сучасні технології
та методи розрахунків у будівництві

Збірник наукових праць

Випуск 23

Луцьк – 2025

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE

LUTSK NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY

**Modern technologies
and methods of calculations in construction**

Collection of scientific articles

Volume 23

Lutsk – 2025

У збірнику наукових статей 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 проєктних рішень у будівництві; енергоєфективних технологій у міському будівництві та господарстві.

Призначений для науковців, фахівців проєктних установ і виробничих підприємств, аспірантів та докторантів, викладачів та здобувачів вищої освіти.

Редакційна колегія:

Головний редактор – **Мікуліч О.А.**, д.т.н., професор (ЛНТУ, Луцьк)

Заступник редактора – **Пустольга С.І.**, д.т.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., професор (ЛНТУ, Луцьк); **Абрамюк І.Г.**, к. арх. (Університет Зеленогурський, Польща); **Бліхарський З.Я.**, д.т.н., професор (НУ «Львівська політехніка», Львів); **Бондарський О.Г.**, к.т.н., доцент (ЛНТУ, Луцьк); **Богаткевич Януш**, доктор інженерії (Люблінська політехніка, Польща); **Борзяк О.С.**, д.т.н., професор (Західнопоморський технологічний університет, м. Щецин, Польща); **Верешко О.В.**, к.т.н., доцент (ЛНТУ, Луцьк); **Голодинов О.І.**, д.т.н., професор (НАУ, Київ); **Гомон С.С.**, д.т.н., професор (НУВГП, Рівне); **Дзюбинська О.В.**, к.е.н., доцент (ЛНТУ, Луцьк); **Дробишинець С.Я.**, к.т.н., доцент (ЛНТУ, Луцьк); **Задорожнікова І.В.**, к.т.н., доцент (ЛНТУ, Луцьк); **Іванченко Г.М.**, д.т.н., професор (КНУБА, Київ); **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); **Кочкаръов Д.В.**, д.т.н., професор (НУВГП, Рівне); **Кундрат М.М.**, д.т.н., професор (НУВГП, Рівне); **Максимович О.В.**, д.т.н., професор (НУ «Львівська політехніка», Львів); **Мельник Ю.А.**, к.т.н., доцент (ЛНТУ, Луцьк); **Наумов В.С.**, д.т.н., професор (Краківська політехніка, Польща); **Павліков А.М.**, д.т.н., професор (ЛНТУ, Полтава); **Парфентьева І.О.**, к.т.н., доцент (ЛНТУ, Луцьк); **Пасічник О.С.**, к.арх., доцент (ЛНТУ, Луцьк); **Пасічник Р.В.**, к.т.н., доцент (ЛНТУ, Луцьк); **Пахолок О.А.**, к.т.н., доцент (ЛНТУ, Луцьк); **Пашинський В.А.**, д.т.н., професор (ЦНТУ, Кропивницький); **Пічугін С.Ф.**, д.т.н., професор (ЛНТУ, Полтава); **Процюк В.О.**, к.т.н., доцент (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); **Смаль М.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); **Ужегов С.О.**, к.т.н., доцент (ЛНТУ, Луцьк); **Ужегова О.А.**, к.т.н., доцент (ЛНТУ, Луцьк); **Чапук О.С.**, к.т.н., доцент (ЛНТУ, Луцьк); **Шимчук О.П.**, к.т.н., доцент (ЛНТУ, Луцьк); **Шишкін О.О.**, д.т.н., професор (КНУ, Кривий Ріг); **Ясюк І.М.**, к.т.н., доцент (ЛНТУ, Луцьк)

Збірник зареєстрований Національною радою України з питань телебачення і радіомовлення (рішення № 40 від 11.01.2024 р., ідентифікатор медіа R30-02453)

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

Матеріали збірника рекомендовані до друку на засіданні вченої ради ЛНТУ (протокол № 11 від 24 червня 2025 р.)

Адреса редакції: 43018, м. Луцьк, вул. Потебні, 56, Луцький національний технічний університет, кафедра будівництва та цивільної інженерії

e-mail: Zbirnukfbid@gmail.com

сайт: <https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/construction/>

Modern technologies and methods of calculations in construction. Lutsk, LNTU. 2025, Volume 23, 428 p. ISSN 2410-6208 (print)

The collection of scientific articles highlights the results of scientific research on building materials and structures; technologies of construction and operation of buildings, engineering and transport systems; theories of resistance of elements of building structures to external influences and calculation methods; modern trends of project solutions in construction; energy-efficient technologies in urban construction and economy.

Intended for scientists, specialists of design institutions and production enterprises, post-graduate and doctoral students, teachers, and students of higher education.

Editorial Board:

Editor-in-Chief – **Mikulich O.A.**, Dr of Techn. Sc., Prof. (LNTU, Lutsk)

Deputy Editor – **Pustyluga S.I.**, Dr of Techn. Sc., Prof. (LNTU, Lutsk)

Executive Secretary – **Rotko S.V.**, Ph.D., As. Prof. (LNTU, Lutsk)

Azizov T.N., Dr of Techn. Sc., Prof. (Pavlo Tychyna USPU, Uman); **Andriichuk O.V.**, Ph.D., Prof. (LNTU, Lutsk); **Abramyuk I.G.**, Ph.D., As. Prof. (University of Zelenogorsk, Poland); **Blikharsky Z.Ya.**, Dr of Techn. Sc., Prof. (LPNU, Lviv); **Bondarsky O.G.**, Ph.D., As. Prof. (LNTU, Lutsk); **Bogatkevych Janusz**, Dr of Techn. Sc., Prof. (Lublin Polytechnic, Poland); **Borzyak O.S.**, Dr of Techn. Sc., Prof. (West Pomeranian University of Technology, Szczecin, Poland); **Vereshko O.V.**, Ph.D., As. Prof. (LNTU, Lutsk); **Golodnov O.I.**, Dr of Techn. Sc., Prof. (NAU, Kyiv); **Gomon S.S.**, Dr of Techn. Sc., Prof. (NUWEE, Rivne); **Dzyubynska O.V.**, Ph.D., As. Prof. (LNTU, Lutsk); **Drobyshynets S.Ya**, Ph.D., As. Prof. (LNTU, Lutsk); **Zadorozhnikova I.V.**, Ph.D., As. Prof. (LNTU, Lutsk); **Ivanchenko G.M.**, Dr of Techn. Sc., Prof. (KNUBA, Kyiv); **Ilchuk N.I.**, Ph.D., As. Prof. (LNTU, Lutsk); **Karaś Sławomir**, Dr of Eng. (Lublin Polytechnic, Lublin, Poland); **Kyslyuk D.Ya.**, Ph.D., As. Prof. (LNTU, Lutsk); **Klymenko Ye.V.**, Dr of Techn. Sc., Prof. (OSACEA, Odesa); **Kochkarev D.V.**, Dr of Techn. Sc., Prof. (NUWEE, Rivne); **Kundrat M.M.**, Dr of Techn. Sc., Prof. (NUWEE, Rivne); **Maksymovych O.V.**, Dr of Techn. Sc., Prof. (LPNU, Lviv); **Melnyk Yu.A.**, Ph.D., As. Prof. (LNTU, Lutsk); **Naumov V.S.**, Dr of Techn. Sc., Prof. (Cracow University of Technology, Cracow, Poland); **Pavlikov A.M.**, Dr of Techn. Sc., Prof. (PNTU, Poltava); **Parfentyeva I.O.**, Ph.D., As. Prof. (LNTU, Lutsk); **Pasichnyk O.S.**, Ph.D., As. Prof. (LNTU, Lutsk); **Pasichnyk R.V.**, Ph.D., As. Prof. (LNTU, Lutsk); **Pakholiuk O.A.**, Ph.D., As. Prof. (LNTU, Lutsk); **Pashinsky V.A.**, Dr of Techn. Sc., As. Prof. (CNTU, Kropyvnytskyi); **Pichugin S.F.**, Dr of Techn. Sc., Prof. (PNTU, Poltava); **Protsyuk V.O.**, Ph.D., As. Prof. (LNTU, Lutsk); **Savenko V.Y.**, Dr of Techn. Sc., Prof. (NTU, Kyiv); **Samchuk V.P.**, Ph.D., As. Prof. (LNTU, Lutsk); **Synii S.V.**, Ph.D., As. Prof. (LNTU, Lutsk); **Smal M.V.**, Ph.D., As. Prof. (LNTU, Lutsk); **Sunak P.O.**, Ph.D., As. Prof. (LNTU, Lutsk); **Trach V.M.**, Dr of Techn. Sc., Prof. (NUWEE, Rivne); **Uzhehov S.O.**, Ph.D., As. Prof. (LNTU, Lutsk); **Uzhehova O.A.**, Ph.D., As. Prof. (LNTU, Lutsk); **Chapyuk O.S.**, Ph.D., As. Prof. (LNTU, Lutsk); **Shymchuk O.P.**, Ph.D., As. Prof. (LNTU, Lutsk); **Shishkin O.O.**, Dr of Techn. Sc., Prof. (KNU, Kryvyi Rih); **Yasyuk I.M.**, Ph.D., As. Prof. (LNTU, Lutsk).

The National Council of Ukraine registers the collection on [Television and Radio Broadcasting](#) (resolution No. 40 dd 11.01.2024, Media ID R30-02453).

The collection is included by the Ministry of Education and Science of Ukraine in the List of scientific professional publications of Ukraine (**category B**), which can publish the results of theses for doctoral and candidate of technical sciences in specialties: **192 Construction and Civil Engineering** (order of the Ministry of Education and Science of Ukraine № 886 dd 02.07.2020); **113 Applied Mathematics**; **122 Computer Science** (Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine №409 dd 17.03.2020).

The materials of the collection were recommended for publication at the meeting of the academic council of the LNTU (protocol No. 11 of June 24, 2025).

Editorial office address: 43018, Lutsk, 56, Potebni St., Lutsk National Technical University, Department of Construction and Civil Engineering, phone (0332) 26-24-60

e-mail: Zbirmukfbd@gmail.com , сайт: <https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/construction/>

© *Lutsk National*

Technical University, 2025

ISSN 2410-6208

УДК 624.012.45:539.3:004.94

О. В. Андрійчук

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6275-097X>

Кафедра будівництва та цивільної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

Д. Ю. Громов

Аспірант, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7862-6662>

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

Моделювання роботи сталевібробетонних конструкцій методом скінченних елементів

Цитувати як:

Андрійчук, О. В., Громов Д. Ю. (2025). Моделювання роботи сталевібробетонних конструкцій методом скінченних елементів. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 23, 5-18. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-01](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-01)

© 2025, Андрійчук, О. В., Громов Д. Ю.

Анотація. У статті розглянуто особливості чисельного моделювання сталевібробетонних конструктивних елементів із використанням методу скінченних елементів (МСЕ). Актуальність дослідження зумовлена потребою в комп'ютерному моделюванні та прогнозуванні напружено-деформованого стану конструкцій із композитних матеріалів, що є необхідним при проєктуванні будівель і споруд. Проведено аналіз підходів до врахування сталевібробетону у чисельному моделюванні, зокрема розглянуто дискретний підхід, за якого фібра моделюється окремими елементами, та гомогенізований, що ґрунтується на усередненні механічних властивостей матеріалу відповідно до складу. Наведено приклади реалізації цих підходів у програмних середовищах ABAQUS, ANSYS і LIRA-FEM. Коректне визначення вихідних параметрів і умов навантаження суттєво впливає на достовірність результатів чисельного моделювання.

Окрему увагу приділено моделюванню нелінійної поведінки матеріалу, зокрема граничних деформацій, процесів утворення та розвитку тріщин, а також прогнозуванню зон локалізації пошкоджень. Проаналізовано результати чисельного моделювання, які узгоджуються з даними експериментальних (стендових) випробувань, зокрема щодо характеру руйнування, залишкової міцності та енергопоглинальної здатності конструкцій зі сталевібробетону.

З'ясовано, що сталевібробетон характеризується підвищеною тріщиностійкістю, змінює механізм руйнування з крихкого на пластичний і забезпечує збереження несучої здатності після утворення тріщин. Показано, що метод скінченних елементів є ефективним інструментом для кількісної оцінки механічних характеристик сталевібробетонних елементів, зокрема в умовах комбінованого навантаження. Зроблено висновок про доцільність використання МСЕ-моделювання в інженерній практиці для обґрунтування конструктивних рішень за умов використання дисперсного армування в бетонних конструкціях.

Ключові слова: сталеві фібробетон, метод скінченних елементів, чисельне моделювання, тріщиностійкість, композитні матеріали, нелінійна поведінка, розрахунок конструкцій.

Вступ

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. У сучасних умовах інтенсивного науково-технічного прогресу, що супроводжується широким впровадженням автоматизованих і цифрових технологій у виробничі процеси, особливої актуальності набуває комплексний підхід до дослідження будівельних конструкцій. Такий підхід передбачає поєднання експериментальних (стендових) випробувань із комп'ютерним моделюванням. Застосування спеціалізованих програмних комплексів підвищує точність аналізу напружено-деформованого стану та оптимізовує розрахункові процедури. Одним із найпоширеніших та ефективних інструментів чисельного аналізу конструкцій є метод скінченних елементів (МСЕ), який забезпечує можливість вирішення як лінійних, так і нелінійних задач у різних технічних галузях [1-3].

У науковій літературі активно висвітлюються підходи до чисельного моделювання сталеві фібробетонних (СФБ) конструкцій. У працях [4-6] представлено загальні принципи реалізації методу скінченних елементів у програмних середовищах LIRA-FEM та ABAQUS, із акцентом на побудову скінченно-елементної сітки, задання граничних умов, візуалізацію результатів і моделювання окремих конструктивних елементів. Дослідження [7] зосереджено на аналізі впливу різномодульної структури композиту на напружено-деформований стан елементів. Натомість у роботі [8] запропоновано модель, яка окремо враховує роботу бетонної матриці, арматури та сталеві фібри, що дозволяє змодельовувати деформування СФБ. Результати науковців [9] свідчать про те, що додавання сталеві фібри підвищує пружність, енергопоглинання та змінює характер руйнування СФБ-балок. Чисельні дані, отримані в ABAQUS, узгоджуються з експериментальними результатами, що підтверджує достовірність моделі. У роботі [10] реалізовано метод глобальної дисперсії для аналізу чутливості до механічних параметрів СФБ-балок. Це дозволило визначити ключові фактори, що впливають на точність чисельного прогнозування їхньої поведінки. Особливу увагу приділено моделюванню тріщиноутворення. У [11] порівняння чисельних та експериментальних результатів засвідчує ефективність уточнення сітки для точного відтворення траєкторії розвитку тріщин.

Попри велику кількість досліджень, присвячених моделюванню сталеві фібробетонних конструкцій, у науковій літературі спостерігається фрагментарність підходів до врахування дисперсного армування. Немає єдиного підходу до вибору типу моделі (дискретної чи гомогенізованої), способу врахування післяпікової поведінки матеріалу та формування

граничних умов у чисельному аналізі. Це ускладнює порівняння результатів і знижує надійність прогнозування механічної поведінки СФБ-елементів. У зв'язку з цим виникає необхідність систематизації існуючих підходів до МСЕ-моделювання з метою узагальнення досвіду та виявлення найбільш ефективних рішень для подальшого їх застосування в інженерній практиці.

Мета і завдання дослідження. Метою статті є системний аналіз та узагальнення сучасних наукових підходів до моделювання роботи сталевібробетонних конструкцій із використанням методу скінченних елементів.

Для досягнення цієї мети поставлено такі завдання:

- 1) класифікувати існуючі підходи до чисельного врахування сталевих фібри (дискретного та гомогенізованого);
- 2) проаналізувати моделі нелінійної деформації, тріщиноутворення та поведінки СФБ при високих рівнях завантаження;
- 3) оцінити можливості та обмеження сучасних програмних комплексів при моделюванні СФБ-елементів;
- 4) визначити переваги та недоліки застосовуваних чисельних методик на основі зіставлення з експериментальними даними.

Матеріали та методи

У роботі використано метод порівняльного аналізу наукових публікацій, присвячених чисельному моделюванню сталевібробетонних конструкцій. Розглянуто підходи, що реалізовані в програмних комплексах ABAQUS, LIRA-FEM, ANSYS, з акцентом на типах моделювання фібри, тріщиностійкості та нелінійної поведінки.

Результати та обговорення

Метод скінченних елементів (МСЕ) є одним із найефективніших чисельних підходів до аналізу механічної поведінки будівельних конструкцій. Його суть полягає в дискретизації неперервного середовища на сукупність окремих скінченних елементів, що взаємодіють між собою в певних точках – вузлах. Завдяки цьому МСЕ дає можливість представити пружну систему як сукупність елементів з обмеженою кількістю ступенів свободи, що з'єднані між собою через вузли. Такий підхід сприяє формалізації всіх етапів розрахунку та уніфікації методики аналізу для різних типів конструкцій, зокрема стержневих систем, пластин, оболонок і об'ємних тіл.

На рис. 1 представлено схематичне зображення дискретизації тіла скінченними елементами та розташування вузлових точок.

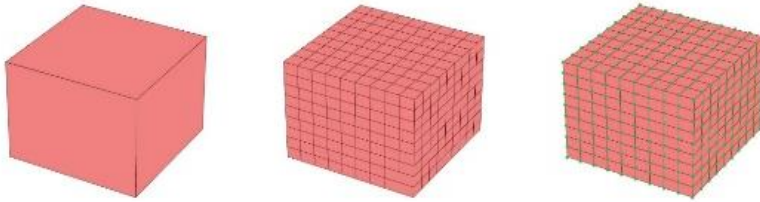


Рис. 1. Схематичне зображення дискретизації тіла скінченними елементами та визначення вузлових точок

Процес розрахунку конструкцій методом скінченних елементів включає кілька основних етапів, наведених нижче.

1. Побудова розрахункової схеми – створення математичної моделі конструкції у вигляді тривимірної геометричної структури або креслення.

2. Дискретизація – поділ об'ємної області на скінченні елементи з урахуванням оптимальних розмірів і форм, що забезпечує необхідну точність розрахунків.

3. Формування вузлових точок – визначення вузлів, через які здійснюється взаємодія між елементами.

4. Вказання міцнісних характеристик – встановлення фізико-механічних параметрів матеріалу (модуль пружності, густина, коефіцієнт Пуассона).

5. Прикладення навантажень та вказання граничних умов – моделювання дії зовнішніх сил, моментів і типів закріплень.

6. Чисельне розв'язання системи рівнянь рівноваги – визначення напружень, деформацій і переміщень конструкції під впливом навантажень.

Даний алгоритм є узагальненим і спрощеним – у практичних розрахунках можливі відхилення, що зумовлені специфікою програмного забезпечення, типом задачі та властивостями матеріалу. Наприклад, при виконанні нелінійного аналізу можуть знадобитися додаткові ітераційні методи, а під час дискретизації складних конструкцій – застосування адаптивних сіток.

Скінченно-елементна сітка (CEC) складається зі скінченних елементів і вузлів, які забезпечують їхню взаємодію. Вибір кількості та типу елементів суттєво впливає на точність моделювання: чим детальніша сітка, тим вища точність розрахунку, однак це потребує кратного зростання обчислення.

Вузли є точками прикладання навантажень, закріплень і передавання сил між елементами. У МСЕ навантаження, навіть розподілені в реальних умовах, задаються у вигляді вузлових сил або моментів.

Для підвищення ефективності аналізу використовують адаптивні сітки, які автоматично уточнюються в зонах концентрації напружень, а також гібридні сітки, що поєднують різні типи елементів.

Усі граничні умови в МСЕ задаються через вузли, тому їхнє правильне формулювання має вирішальне значення для адекватності чисельної моделі реальним умовам роботи конструкції.

Метод скінченних елементів широко застосовується в механіці, фізиці та інженерії для розв'язання складних задач чисельного аналізу. Його суть полягає у заміні неперервної області (наприклад, тіла або конструкції) сукупністю скінченних елементів, для яких формулюються рівняння, що згодом об'єднуються в загальну систему. Такий підхід дозволяє розв'язувати інтегральні та часткові диференціальні рівняння, зводячи їх до системи звичайних рівнянь, які вирішуються стандартними чисельними методами – зокрема методами Ейлера, Рунге-Кутти та ін. Оскільки підготовка розрахункової моделі є трудомістким процесом, для її автоматизації застосовують препроцесори, які значно спрощують створення скінченно-елементної сітки – зокрема, на основі CAD-моделей.

Дані, сформовані за допомогою препроцесора, передаються в обчислювальне ядро методу скінченних елементів, яке розв'язує систему лінійних або нелінійних рівнянь:

$$K_{ij}u_j = f_j,$$

де u_j – переміщення, а f_j – зовнішні сили у вузлах.

Формування матриці жорсткості K залежить від типу задачі, наприклад, аналізу напружено-деформованого стану ферм чи пружних елементів. Більшість комерційних програмних продуктів містять бібліотеки готових елементів, що дає змогу адаптивно підбирати їх відповідно до поставленої задачі [5].

На сьогодні існує широкий спектр програмних продуктів, що реалізують метод скінченних елементів. Серед найбільш відомих можна відзначити ANSYS, Abaqus FEA, MSC Nastran, COMSOL Multiphysics, LS-DYNA, SolidWorks Simulation, Autodesk Inventor Nastran, Altair HyperWorks, Code_Aster, Simcenter 3D, Deal.II, Elmer FEM Solver, DIANA FEA, Femap, Z88 FE, FreeFEM++, Salome-Meca, GetDP, OpenFOAM, LibMesh, FeniCS, MATLAB, CalculiX, Zebulon, а також LIRA-FEM.

Серед українських фахівців і науковців, що займаються дослідженням і проектуванням будівельних конструкцій, широкого поширення набув програмний комплекс LIRA-FEM – багатофункціональне інженерне середовище для розрахунку конструкцій на основі методу скінченних елементів. Система дозволяє аналізувати вплив статичних і динамічних навантажень, виконувати підбір перерізів сталевих і залізобетонних елементів, моделювати ґрунтову основу та досліджувати поведінку споруд на всіх етапах життєвого циклу – від монтажу до експлуатації. Метод реалізовано у формі переміщень, тобто невідомими величинами є переміщення вузлів, що полегшує алгоритмізацію розрахункових моделей і сприяє автоматизації процесів. Завдяки цьому

LIRA-FEM дозволяє ефективно використовувати сучасні обчислювальні ресурси при аналізі складних та великомасштабних конструкцій.

На рис. 2 представлено результати розрахунку будівлі у вигляді переміщень.

На рис. 3 наведено приклади геометричних моделей лотка у формі напівтруби та труби, створених у середовищі LIRA-FEM [1, 2].

Застосування програмного комплексу LIRA-FEM дає змогу визначати числові значення згинальних моментів і напружень, що виникають у сталевібробетонних конструктивних елементах під впливом заданих навантажень. Порівняння отриманих результатів із граничними моментами, розрахованими теоретично, дозволяє оцінити доцільність подальшої експлуатації таких конструкцій в конкретних умовах навантаження [1-3].

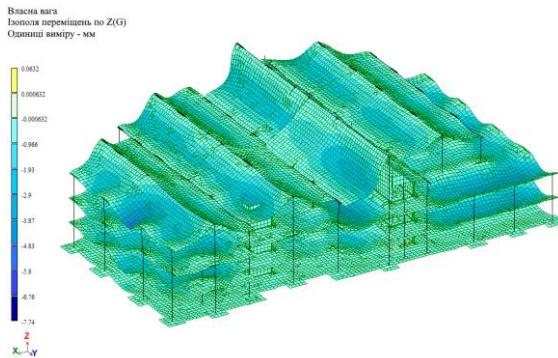


Рис. 2. Результат розрахунку методом скінченних елементів у вигляді переміщень [4]

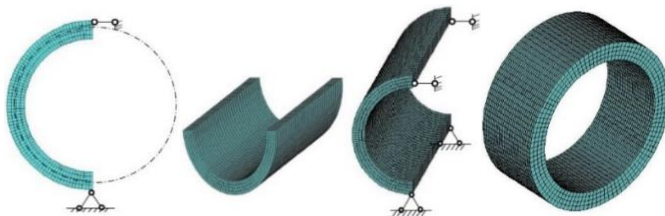


Рис. 3. Модель лотка у формі напівтруби і елемента кільцевого перерізу

Раніше аналіз методом скінченних елементів здебільшого здійснювався у формі числових таблиць, що ускладнювало виявлення критичних зон напружень і деформацій. Із розвитком програмного забезпечення цей процес було значно спрощено завдяки впровадженню

графічних інтерфейсів для візуалізації результатів. Постпроцесори автоматично формують кольорові контури, які відображають рівні напружень і деформацій у моделі, забезпечуючи наочне представлення напруженого стану конструкції. У багатьох випадках така візуалізація є співставною за інформативністю з фотореалістичними результатами експериментальних досліджень [5].

Окрім того, сучасні програмні комплекси підтримують паралельні обчислення та GPU-акселерацію, що суттєво підвищує швидкість розв'язання великих систем рівнянь. Водночас ефективність таких обчислень залежить від типу задачі, розміру моделі та специфіки обраного програмного середовища.

На рис. 4 представлено результати розрахунків ізополів напружень для нерозрізної сталевібробетонної балки [6], а також для тонкостінної конструкції покриття у формі гіперболічного параболоїда з СФБ [3].

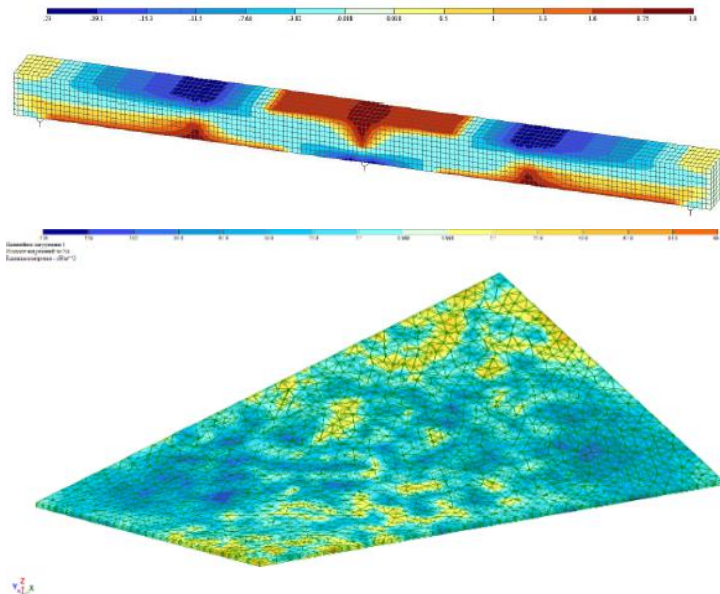


Рис. 4. Ізополя напружень у нерозрізній СФБ-балці та СФБ-оболонці

Дослідження композитних матеріалів у контексті методу скінченних елементів є складнішим завданням порівняно з аналізом однорідних матеріалів, оскільки композити мають неоднорідну структуру та вимагають спеціалізованих підходів до визначення їхніх механічних характеристик.

Зокрема, при моделюванні СФБ конструкцій слід враховувати, що цей матеріал складається з компонентів, які демонструють різні механічні

властивості залежно від виду напруженого стану – розтягу, стиску чи згину. Це зумовлює розбіжності у значеннях пружних сталей та потребує уточнення підходів до чисельного моделювання.

При чисельному моделюванні фібробетонних конструкцій методом скінченних елементів застосовуються два основні підходи до врахування впливу сталевих фібри: дискретний та гомогенізований.

У дискретному підході кожне волокно моделюється як окремий елемент, що дозволяє детально відтворити локальні ефекти, але значно ускладнює розрахункову модель. Натомість у гомогенізованому підході фібробетон розглядається як ефективно однорідний композитний матеріал із зведеними (усередненими) механічними характеристиками. Такий підхід є більш поширеним у практиці, оскільки знижує обчислювальні витрати.

Ключовими параметрами сталевих фібри, що впливають на результати чисельного моделювання, є її довжина, діаметр, геометрична форма, механічна міцність та об'ємна концентрація. Їх урахування має важливе значення для правильної оцінки жорсткості матеріалу та його тріщиностійкості. Найчастіше гомогенізований підхід реалізується шляхом коригування діаграми «напруження–деформації» бетону, що дозволяє враховувати ефект підсилення в зоні розтягу після утворення тріщин.

Наприклад, у роботі [7] запропоновано методику розрахунку деформування конструктивних елементів, виготовлених із композитів, з урахуванням різномодульності їхніх компонентів за умов статичних і динамічних навантажень з метою підвищення точності розрахунків.

На відміну від традиційних підходів, які зазвичай враховують лише зростання напружень розтягу в бетоні під впливом сталевих фібри, у дослідженні [8] окремо аналізується внесок трьох складових: бетонної матриці, класичного армування та сталевих фібри. Такий підхід є сучасним і перспективним для моделювання конструкцій з композитних матеріалів.

У [9] також доведено, що моделювання методом скінченних елементів у середовищі ABAQUS дозволяє ефективно прогнозувати схему пошкоджень, низхідну ділянку кривої «навантаження–переміщення» та кінцеві зміщення, забезпечуючи достовірну оцінку пластичності конструкції та її енергопоглинальної здатності. Отримані аналітичні дані підтверджуються результатами експериментальних випробувань.

У дослідженні [10] проведено аналіз чутливості параметрів матеріалу залізобетонної балки з дисперсним армуванням сталевими фібрами (SFRC) під час згину, з використанням методу глобальної дисперсії в поєднанні з волоконною скінченно-елементною моделлю. Метою роботи є визначення тих параметрів матеріалу, невизначеність яких має найбільший вплив на механічну поведінку SFRC-балки. Для перевірки ефективності обраного підходу виконано числове моделювання згинальної поведінки балки SFRC.

У дослідженні [11] для чисельного аналізу поведінки сталеві фібробетону реалізовано користувальну модель у програмному

середовищі MSC Marc на основі багаторівневої модельної концепції. Необхідні параметри (модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, границя міцності на стиск і розтяг) визначалися експериментально або розраховувалися за допомогою субмоделей. Рисунок 5 демонструє високу відповідність між чисельними та експериментальними результатами при центральному навантаженні на площі 50×50 мм. Модель достовірно відображає пластичну поведінку СФБ, зокрема, множинне тріщиноутворення. На відміну від крихкого руйнування неармованих зразків, СФБ руйнується з локалізацією руйнування.

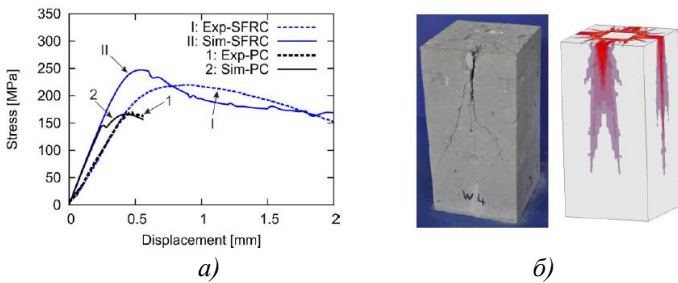


Рис. 5. а) залежність напруження від переміщення для зразків із СФБ та неармованого бетону; б) характер утворення тріщин у зразку із СФБ [11]

Процес руйнування залізобетону бетону має наступний характер: утворення тріщин у зоні розтягу; пластичне деформування в зоні стиску; текучість арматури під дією навантаження.

Числове моделювання тріщиноутворення в бетонних конструкціях є важливим інструментом оцінки їхньої міцності та довговічності. Одним із ключових завдань у цьому контексті є точне визначення траєкторії розвитку тріщин, зокрема в зоні розтягу. У дослідженні [12] крихке руйнування матеріалу моделювалося окремо, що дозволило прогнозувати характер поширення тріщин у залізобетонних елементах.

Для підвищення точності таких прогнозів у [12] було розглянуто різні варіанти дискретизації розрахункової області. Встановлено, що застосування дрібної сітки є критично важливим для коректного відображення полів напружень і деформацій, особливо за дії ударного навантаження.

Результати аналізу показали, що більшість тріщин у дослідних плитах поширювалися радіально – від центру до країв, тоді як локалізоване руйнування зосереджене в центральній частині прольоту. Це пов'язано зі зниженням жорсткості бетонної поверхні в зоні розтягу. Порівняння числового моделювання з/б-плит з експериментальними результатами, представленими на рис. 6, підтверджує, що оптимальний вибір сітки та

врахування потенційних траєкторій поширення тріщин забезпечують достовірне прогнозування характеру їх розвитку [12].

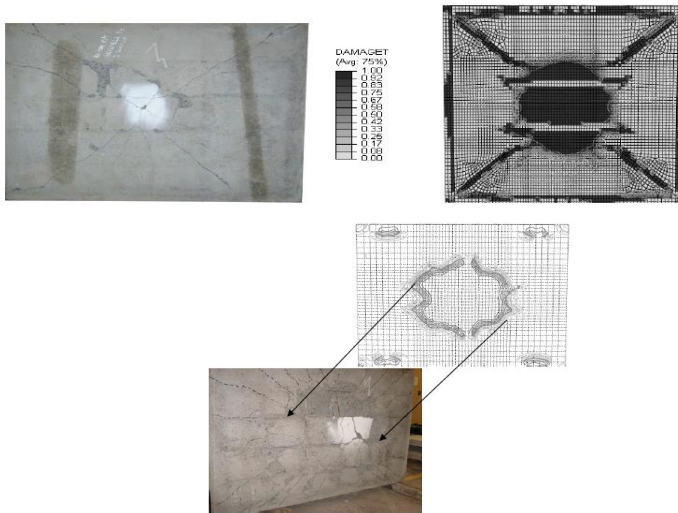


Рис. 6. Тріщиноутворення в експериментальному та чисельному дослідженнях

Для достовірного відтворення механічної поведінки сталевібробетону в умовах нелінійного деформування застосовуються ітераційні чисельні методи, які враховують пластичність сталі та поступове зниження міцності бетону при розтягу.

При чисельному моделюванні використовуються моделі розподілених тріщин (smeared crack) або окремих тріщин (discrete crack), які дозволяють достовірно відображати процес тріщиноутворення в матеріалі.

Застосування таких моделей дає змогу оцінити граничну несучу здатність конструкцій, яка зберігається завдяки дії сталевібробетону, що виконує функцію «зшивання» тріщин та забезпечує залишкову жорсткість і енергопоглинання.

Висновки

У статті розглянуто особливості моделювання роботи сталевібробетонних елементів із використанням методу скінченних елементів. Застосування цього підходу дає змогу детально аналізувати напружено-деформований стан конструкцій, прогнозувати їхню поведінку під дією навантажень і приймати обґрунтовані конструктивні рішення.

Результати чисельного моделювання засвідчують покращення механічних характеристик СФБ елементів порівняно з традиційним залізобетоном. Зокрема, додавання сталеві фібри збільшує міцність на розтяг, зменшує інтенсивність тріщиноутворення. При цьому характер руйнування змінюється з крихкого на пластичний, що забезпечує підвищену довговічність і надійність в експлуатації.

Високу точність чисельного прогнозування забезпечують такі чинники, як коректне формулювання граничних умов, вибір відповідного типу скінченних елементів і оптимальна дискретизація сітки. Аналіз результатів підтверджує, що МСЕ-моделювання відтворює тріщиноутворення у СФБ-елементах, що узгоджується із даними експериментальних досліджень.

Таким чином, метод скінченних елементів є ефективним інструментом для встановлення роботи сталеві фібробетонних конструкцій. Він забезпечує точну кількісну оцінку напружено-деформованого стану, проектної міцності та довговічності, що робить його перспективним методом у проектуванні та оптимізації композитних залізобетонних систем.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. Andriichuk, O. V., Yasiuk, I. M. (2021). Doslidzhennia roboty stalefibrobetonnykh lotkiv pry dii odnorazovykh navantazhen' za dopomohoiu prohrannoho kompleksu Lira. Resursoekonomichni materialy, konstruktсии, budivli ta sporudy, 40, 79-86. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i40.012> .
2. Andriichuk, O. V. (2014). Zastosuvannia prohrannoho kompleksu Lira pry doslidzhenni roboty stalefibrobetonnykh elementiv kil'tsevoho pereryzu za dii odnorazovykh navantazhen'. Suchasni tekhnolohii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi, 1, 3-11.
3. Andriichuk, O. V., Hryhorchuk, A. B., Uzhehov, S. O. (2017). Hiperbolichnyi paraboloid zi stalefibrobetonu pry dii odnorazovykh navantazhen' za dopomohoiu

prohramnoho kompleksu LIRA-SAPR. Resursoekonomni materialy, konstruksii, budivli ta sporudy, 34, 176-183. http://nbuv.gov.ua/UJRN/rmkbs_2017_34_24

4. Prohrama dlia rozrakhunku za metodom skinchennykh elementiv. Prohramy dlia rozrakhunku ta proektuvannia konstruksii. <https://www.liraland.ua/solutions/functionality/fem.php> (accessed: 22.02.2025).

5 Roylance, D. 5.3: Analiz skinchennykh elementiv. LibreTexts – Ukrayinska. <https://ukrayinska.libretexts.org> (accessed: 22.02.2025).

6. Ninichuk, M. V. (2021). Napruzhenno-deformovanyi stan ta rozrakhunok kombinovano-armovanykh nerozriznykh zalizobetonnykh balok: dysertatsiia kandydata tekhnichnykh nauk, 05.23.01 – Budivelni konstruksii, budivli ta sporudy. Luts'kyi natsionalnyi tekhnichnyi universytet. 181 s.

7. Smoliankova, T. M. (2021). Matematychni modeliuvannia mekhanichnykh kharakterystyk voloknistykh kompozytiv iz riznomodul'nymy komponentamy: dysertatsiia doktora filosofii, 113 – Prykladna matematika. Zaporiz'kyi natsionalnyi universytet. 133 s.

8. Lee, S.-C., Cho, J.-Y., Vecchio, F. J. (2016). Analysis of steel fiber-reinforced concrete elements subjected to shear. ACI Structural Journal, 113(2), 275-286. <https://doi.org/10.14359/51688474>.

9. Fares, A. M. H., Bakir, B. B. (2024). Parametric study on the flexural behavior of steel fiber reinforced concrete beams utilizing nonlinear finite element analysis. Structures, 65, Article 106688. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106688>.

10. Blagojevic, P., Blagojevic, N., Kukaras, D. (2021). Behavior of steel fiber-reinforced concrete beams under bending: Probabilistic numerical modeling and sensitivity analysis. Applied Sciences, 11(20), Article 9591. <https://doi.org/10.3390/app11209591>.

11. Breitenbücher, R., Meschke, G., Song, F., Hofmann, M., Zhan, Y. (2014). Experimental and numerical study on the load-bearing behavior of steel fiber reinforced concrete for precast tunnel lining segments under concentrated loads. Proceedings of the FRC 2014 Joint ACI-fib International Workshop: Fiber Reinforced Concrete: From Design to Structural Applications, 417-429.

12. Tahmasebinia, F., Remennikov, A. (2008). Simulation of the reinforced concrete slabs under impact loading. In E. E. Gad & B. Wong (Eds.), Australasian Structural Engineering Conference (ASEC), 26-27 June 2008, Melbourne, Australia (p. 101). The Meeting Planners. <http://ro.uow.edu.au/engpapers/3224>.

Література

1. Андрійчук, О. В., Ясюк, І. М. (2021). Дослідження роботи сталевібробетонних лотків при дії одноразових навантажень за допомогою програмного комплексу Ліра. Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди, 40, 79-86. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i40.012>.

2. Андрійчук, О. В. (2014). Застосування програмного комплексу Ліра при дослідженні роботи сталевібробетонних елементів кільцевого перерізу за дії одноразових навантажень. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві, 1, 3-11.

3. Андрійчук, О. В., Григорчук, А. Б., Ужegov, С. О. (2017). Гіперболічний параболід зі сталевібробетону при дії одноразових навантажень за допомогою програмного комплексу ЛІРА-САПР. Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди, 34, 176-183. http://nbuv.gov.ua/UJRN/rmkbs_2017_34_24.

4. Програма для розрахунку за методом скінченних елементів. Програми для розрахунку та проектування конструкцій. <https://www.liraland.ua/solutions/functionality/fem.php> (дата звернення: 22.02.2025).
5. Roylance, D. 5.3: Аналіз скінченних елементів. LibreTexts – Ukrayinska. <https://ukrayinska.libretexts.org> (дата звернення: 22.02.2025).
6. Нінічук, М. В. (2021). Напружено-деформований стан та розрахунок комбіновано-армованих нерозрізних залізобетонних балок: дисертація кандидата технічних наук, 05.23.01 – Будівельні конструкції, будівлі та споруди. Луцький національний технічний університет. 181 с.
7. Смолянкова, Т. М. (2021). Математичне моделювання механічних характеристик волокнистих композитів із різномодульними компонентами: дисертація доктора філософії, 113 – Прикладна математика. Запорізький національний університет. 133 с.
8. Lee, S.-C., Cho, J.-Y., Vecchio, F. J. (2016). Analysis of steel fiber-reinforced concrete elements subjected to shear. *ACI Structural Journal*, 113(2), 275-286. <https://doi.org/10.14359/51688474>.
9. Fares, A. M. H., Bakir, B. B. (2024). Parametric study on the flexural behavior of steel fiber reinforced concrete beams utilizing nonlinear finite element analysis. *Structures*, 65, Article 106688. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106688>.
10. Blagojevic, P., Blagojevic, N., Kukaras, D. (2021). Behavior of steel fiber-reinforced concrete beams under bending: Probabilistic numerical modeling and sensitivity analysis. *Applied Sciences*, 11(20), Article 9591. <https://doi.org/10.3390/app11209591>.
11. Breitenbücher, R., Meschke, G., Song, F., Hofmann, M., Zhan, Y. (2014). Experimental and numerical study on the load-bearing behavior of steel fiber reinforced concrete for precast tunnel lining segments under concentrated loads. *Proceedings of the FRC 2014 Joint ACI-fib International Workshop: Fiber Reinforced Concrete: From Design to Structural Applications*, 417-429.
12. Tahmasebinia, F., Remennikov, A. (2008). Simulation of the reinforced concrete slabs under impact loading. In E. E. Gad & B. Wong (Eds.), *Australasian Structural Engineering Conference (ASEC)*, 26-27 June 2008, Melbourne, Australia (p. 101). The Meeting Planners. <http://ro.uow.edu.au/engpapers/3224>.

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 20.05.2025	Received 20.05.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 29.05.2025	Received in revised form 29.05.2025
Прийнято 01.06.2025	Accepted 01.06.2025
Опубліковано 25.06.2025	Published 25.06.2025

O. V. Andriichuk

Ph.D., Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6275-097X>
Department of Building and Civil Engineering
Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

D. Y. Hromov

Postgraduate student
Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

Modeling the behavior of steel fiber reinforced concrete structures using the finite element method

How to Cite:

Andriichuk, O. V., Hromov D. Y. (2025). Modeling the behavior of steel fiber reinforced concrete structures using the finite element method. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 23, 5-18. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-01](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-01)

Abstract. The article examines the specific features of numerical modeling of steel fiber reinforced concrete (SFRC) structural elements using the finite element method (FEM). The relevance of the research is driven by the need for computer modeling and prediction of the stress-strain state of composite material structures, which is essential for the design of buildings and structures. The study analyzes approaches to incorporating steel fibers in numerical modeling, in particular, the discrete approach, where fibers are modeled as individual elements, and the homogenized approach, which is based on the averaging of the mechanical properties of the material in accordance with its composition. Examples of the implementation of these approaches in the software environments ABAQUS, ANSYS, and LIRA-FEM are provided. The accurate specification of input parameters and loading conditions has a significant impact on the reliability of the numerical simulation results.

Special attention is paid to modeling the nonlinear behavior of the material, including limit deformations, crack initiation and propagation, as well as the prediction of damage localization zones. The results of numerical modeling are analyzed and shown to be consistent with experimental (laboratory-scale) test data, particularly in terms of failure patterns, residual strength, and the energy absorption capacity of SFRC structures.

It has been determined that SFRC is characterized by increased crack resistance, alters the failure mechanism from brittle to ductile, and ensures the retention of load-bearing capacity after cracking. The finite element method is shown to be an effective tool for the quantitative assessment of the mechanical characteristics of SFRC elements, especially under combined loading conditions. The study concludes that FEM-based modeling is appropriate for use in engineering practice to justify structural solutions involving dispersed reinforcement in concrete structures.

Keywords: steel fiber reinforced concrete, finite element method, numerical modeling, crack resistance, composite materials, nonlinear behavior, structural analysis.

УДК 625.7/8

О. О. Арінушкіна*

асистент, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-6870-3764>

Кафедра будівництва та експлуатації автомобільних доріг ім. О.К. Біруля
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25,
Харків, Україна, 61002

Д. Ю. Костін

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4278-2990>

Кафедра будівництва та експлуатації автомобільних доріг ім. О.К. Біруля
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25,
Харків, Україна, 61002

*автор-кореспондент, e-mail: lenaarinushkina@gmail.com

**Дослідження оптимальної концентрації поліпропіленових
фіброволокон у крупнозернистих щебенево-піщаних сумішах,
укріплених цементом**

Цитувати як:

Арінушкіна, О. О., Костін, Д. Ю. (2025). Дослідження оптимальної концентрації поліпропіленових фіброволокон у крупнозернистих щебенево-піщаних сумішах, укріплених цементом. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 23, 19-30. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-02](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-02)

© 2025, Арінушкіна, О. О., Костін, Д. Ю.

Анотація. Останнім часом щебенево-піщані суміші є одним із найбільш широко застосовуваних дорожньо-будівельних матеріалів для влаштування шарів основ дорожніх одягів в Україні. Все частіше під час будівництва, ремонтів та реконструкції автомобільних доріг для їх укріплення застосовуються як мінеральні, так і комбіновані в'язучі. Одним із шляхів покращення властивостей будівельних матеріалів є їх армування різними фіброволокнами. Аналіз літературних джерел показав, що введення фіброволокон до складу ґрунтів, зміцнених цементом, а також цементбетонів суттєво покращує фізико-механічні властивості та довговічність цих дорожньо-будівельних матеріалів.

У статті представлено результати виконаного експериментального дослідження стосовно встановлення оптимального вмісту поліпропіленових фіброволокон на фізико-механічні властивості крупнозернистих щебенево-піщаних сумішей, укріплених мінеральним в'язучим (цементом). Дослідження виконані на крупнозернистій щебенево-піщаній суміші зміцненій цементом у кількості 2 %.

Результатами дослідження встановлено, що для даних сумішей за досліджуваними показниками, а саме міцність на стиск та міцність на непрямий розтяг, оптимальний вміст поліпропіленової фібри довжиною 18 мм становить 0,03 % від маси мінеральної частини суміші. За цих концентрацій показник границі міцності на стиск збільшується на 3,4 %, а міцність на непрямий розтяг збільшується на 35 %. Встановлено, що подальше збільшення концентрації

поліпропіленових фіброволокон від оптимального, призводить до негативного впливу на показники, що досліджувалися, та нівелює їх роботу в матеріалі, так як відбувається перенасичення суміші волоконм і велика їх кількість збивається в пучки, які нерівномірно розподіляються в суміші та в кінцевому результаті погіршують фізико-механічні показники.

Ключові слова: автомобільна дорога, дорожній одяг, шари основи, ремонтно-будівельні роботи, фіброволокна, міцність на стиск, міцність на непрямий розтяг.

Вступ

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми

Зараз в Україні спостерігається стійка тенденція до збільшення використання в якості шарів основ дорожніх одягів щебенево-піщаних матеріалів, укріплених різними в'язучими. Можливе їх укріплення як неорганічними, органічними та комбінованими в'язучими. Частіше за все використовуються мінеральні в'язучі (як правило цемент). Такі шари є достатньо міцними, при цьому їх вартість є відносно невеликою завдяки тому, що вміст в'язучого в їх складі мінімальний. Але головним їх недоліком є низька морозо- та тріщиностійкість, а це може впливати на довговічність всієї конструкції дорожнього одягу. В умовах клімату України, де кількість переходів середньодобової температури через 0 °C в осінньо-зимово-весняний період майже по всій її території є надзвичайно великою і матеріали в шарах дорожнього одягу піддаються багатьом циклам заморожування-відтавання, ця проблема постає особливо актуальною. Тому проблема удосконалення технології приготування щебенево-піщаних сумішей, укріплених цементом є дуже гострою і актуальним питанням є пошук недорогих, але ефективних способів покращення їх властивостей. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є додавання фіброволокон (поліпропіленових, базальтових, целюлозних, сталевих, скловолкна та ін.) у склад цих сумішей. Відомо, що фіброволокна у складі будівельних матеріалів дозволяють створити міцний та стійкий до утворення мікротріщин та усадки матеріал. Але на даний момент чітко не визначено вплив їх концентрації на фізико-механічні властивості укріплених крупнозернистих щебенево-піщаних сумішей. Проте є досить багато інформації щодо їх використання в інших матеріалах, що застосовуються в шарах дорожніх одягів. Визначенням впливу різних фіброволокон різної довжини та у різній концентрації в матеріалах, що використовуються для влаштування шарів основ дорожніх одягів займалися Жданюк В.К., Оніщенко А.В., Гамеляк І.П., Толмачов С.М., Панасюк Я.І., Сідун Ю.В., Бражнік Г.В. Сунь Дзянь, та інші. Аналіз літературних джерел [1] показав, що додавання поліпропіленових фіброволокон у склад ґрунтів в оптимальній кількості 0,05 % від маси ґрунту дозволяє підвищити марку цього матеріалу за міцністю. За даними автора Встановлено, що при

введенні 0,05 % поліпропіленових фіброволокон до складу цементогрунту різних марок за міцністю, підвищується значення границі міцності на розтяг при згині – в межах від 1,55 до 1,80 разів, а також зростання модуля пружності від 1,30 до 1,50 рази. Ефективність від додавання поліпропіленових фіброволокон до складу окремих марок цементогрунту полягає у переході його арки за міцністю та за величиною модуля пружності, а також границі міцності на розтяг при згині в більш високу марку. Введення 0,05% поліпропіленових фіброволокон до складу цементогрунту марки М40, підвищує його в марку М60 за фактичними значеннями розрахункових характеристик. У роботі Сунь Дзяня [2] встановлено, що оптимальною концентрацією базальтових фіброволокон у складі щебенево-піщаних сумішей із залістистих кварцитів є 0,05% від їх піщаної частини. При цій концентрації досягаються максимальні значення фізико-механічних властивостей цих сумішей та розрахункових характеристик. Спостерігається максимальне зростання значень границі міцності за стиску, границі міцності на непрямий розтяг та значень розрахункових характеристик матеріалу з ЩПС-40 із залістистих кварцитів зміцнених 4% цементу.

У дисертаційній роботі Бражнік А.В. [3] було досліджено вплив поліпропіленових та інших видів фіброволокон на властивості монолітних дорожніх цементних бетонів. Авторкою було визначено позитивний вплив поліпропіленових фіброволокон разом із повітроутягуючою добавкою на показник морозостійкості даного матеріалу, хоча і спостерігалось зниження міцності бетонів на стиск. Також було визначено, що застосування фібри замість повітроутягуючої добавки сприяло меншому зниженню міцності бетону за однакового повітроутягненні. Також вчені [4,5] займались вивченням впливу поліпропіленових фіброволокон на матеріали, що застосовуються в якості шарів основ дорожніх одягів та їх позитивний вплив на їх фізико-механічні властивості. Попередні дослідження [6] показали, що при вмісті поліпропіленових фіброволокон 0,05% від маси мінерального матеріалу в укріплених цементом щебенево-піщаних сумішах спостерігається зростання досліджених показників границі міцності за стиску та границі міцності на розтяг при вигині в 1,18 рази та 1,79 рази відповідно для марки М10. На сумішах марки за міцністю М75 ефект від введення фіброволокон зменшується 1,09 та 1,35 рази. За вмісту фіброволокон у кількості 0,05% для укріплених дрібнозернистих, середньозернистих, та крупнозернистих щебенево-піщаних сумішей не спостерігалось. Тому, на даному етапі, актуально дослідити вплив концентрації поліпропіленових фіброволокон на укріплені крупнозернисті щебенево-піщані суміші, особливо низьких марок, які набули найбільш широкого застосування, залишається майже не досліджений.

Мета і завдання дослідження. Для щебенево-піщаних сумішей укріплених цементом, особливо низьких марок, які останнім часом набули

найбільш широкого застосування при виконанні ремонтно-будівельних робіт на дорожній мережі, є низька тріщиностійкість та морозостійкість, особливо для матеріалів які за міцністю, відповідають марці М20. Одним із способів покращення цих показників є додавання фіброволокон до їх складу. Таким чином метою даного дослідження є встановлення оптимального вмісту поліпропіленових фіброволокон в крупнозернистій щебенево-піщаній суміші укріпленій цементом марки М20, для проведення подальших досліджень їх впливу на морозостійкість.

Матеріали та методи

Для приготування щебенево-піщаних сумішей згідно вимог ДСТУ 9177-3:2022 [7] використовувався щебінь та відсів подрібнення гранітної гірської породи виробництва Мало-Конівського спецкар'єру. Вихідний кам'яний матеріал був перевірений на відповідність чинних стандартів та розподілений за фракціями (крім відсіву), отримані гранулометричні склади кам'яних матеріалів представлені в таблиці 1.

Таблиця 1. Гранулометричні склади прийнятих для досліджень вихідних матеріалів

Розмір сит, мм	40	20	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	0,071	<0,071
Відсів 0-5 мм	0	0	0	0	29	47	63	79	89	97	100
Щебень 5-10 мм	0	0	0	100	100	100	100	100	100	100	100
Щебень 10-20 мм	0	0	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Щебень 20-40 мм	0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

З отриманих мінеральних складових була розрахована і прийнята для подальших досліджень крупнозерниста щебенево-піщана суміш гранулометричний склад якої максимально наближений до середнього та відповідав вимогам [7]. Прийнятий для досліджень зерновий склад представлено на рис. 1.

В якості мінерального в'язучого використовувався портландцемент виробництва ПрАТ «Івано-Франківськ цемент» марки М400 властивості якого відповідали вимогам ДСТУ Б В.2.7-46:2010 [8] та вода згідно ДСТУ Б В.2.7-273:2011 [9]. Для досліджень використовувались фіброволокна довжиною 18 мм виготовлені за ТУ У 24.7-32781078-001:2006 [10].

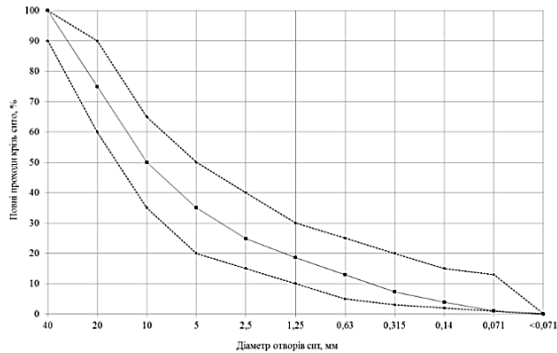


Рис. 1. Прийнятий для подальших досліджень зерновий склад крупнозернистої щебенево-піщаної суміші

Приготування укріпленої щебенево-піщаної суміші виконувалось за допомогою лабораторної мішалки (рис. 2).



Рис. 2. Лабораторна мішалка для приготування сумішей

Безпосередньо в мішалку на першому етапі вводилась піщана частина суміші, наступним компонентом вводили цемент, для сумішей з фіброволоконами, їх вводили разом з 2-ма відсотками цементу. Після чого виконували перемішування протягом 60 сек з 50 % вмістом води від розрахованого складу. Поліпропіленові фіброволокна вводили до загального складу суміші у кількості 0,01 %, 0,03 %, 0,05 % та 0,07 %. Під час перемішування сумішей з вмістом фібри 0,05 % та 0,07 % візуально спостерігалось скупчення фібри в окремі пучки, що свідчить про перенасичення сумішей фіброю (рис. 3 та рис. 4).

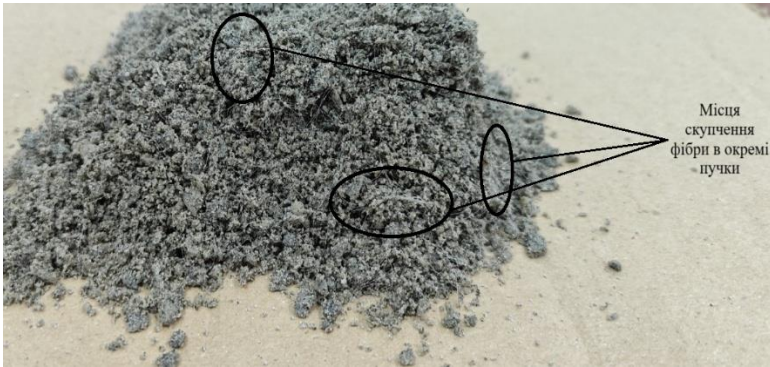


Рис. 3. Піщана частина суміші з вмістом фіброволокон 0,05 %

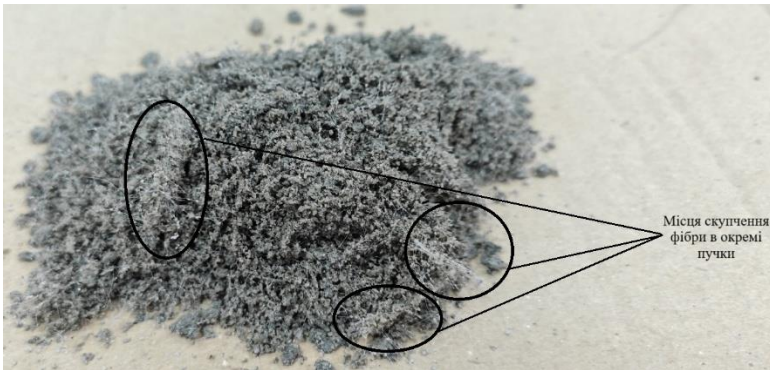


Рис. 4. Піщана частина суміші з вмістом фіброволокон 0,07 %

Наступним етапом приготування суміші було вивантаження перемішаних матеріалів з мішалки та подальше їх ручне перемішування зі щелевеною частиною та часткою води, що залишилась.

Після приготування сумішей, методом пресування виготовлялись лабораторні зразки-циліндри, які відповідним чином маркувались та переміщувались в ванну з гідравлічним затвором на 26 діб до набору проектної міцності.

Під час проведення випробувань використовувались стандартні методи для визначення показників міцності за стиску та на непрямий розтяг, для цього використовувалась випробувальна машина Р-20.

Результати та обговорення

Для проведення досліджень було виготовлено 5 серій зразків. Після витримування зразків у ванні з гідравлічним затвором, перед настанням 28 діб, зразки водонасичувались протягом 48 годин перед початком

проведення випробувань. Результати отриманих досліджень представлені на рис. 5 та рис. 6.

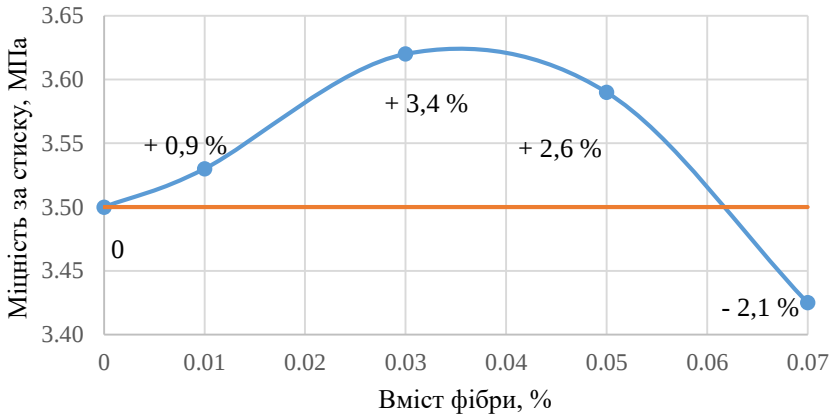


Рис. 5. Результати досліджень показника міцність за стиску від вмісту фібри

Аналіз отриманих результатів дослідження показав, що на показник границя міцності при стиску для крупнозернистих щебеневовісцианих сумішей суттєвого впливу вміст фібри не оказує. Максимальний приріст склав 3,4% при концентрації фіброволокон у складі суміші 0,03%. При вмісті фіброволокон у складі суміші 0,07% показник границі міцності за стиску зменшився на 2,1%, що свідчить про перенасичення суміші фіброволокнами та отримання негативного за даного вмісту впливу на структуру укріпленої щебеневовісцианої суміші.

Вплив фіброволокон більш суттєво оказує на міцність на непрямий розтяг ніж за стиску та є більш інформативним показником. Встановлено, що при концентрації фібри у кількості 0,03%, в складі крупнозернистої щебеневовісцианої суміші, можливо досягти підвищення міцності матеріалу на непрямий розтяг на 35% в порівнянні з укріпленими крупнозернистими щебеневовісцианими сумішами без фіброволокон. Після руйнування зразків, в зразках з вмістом поліпропіленових фіброволокон 0,05% та 0,07% в структурі матеріалу спостерігалися окремі пучки, що свідчить про нерівномірний розподіл фібри в матеріалі. Фотофіксація поверхні розколу окремих зразків після випробування на міцність з різним вмістом фіброволокон на непрямий розтяг наведені на рис. 7.

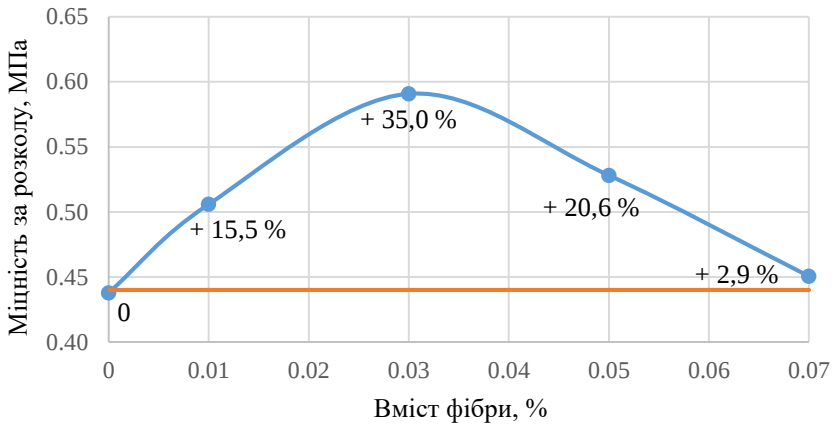


Рис. 6. Результати досліджень показника міцність на непрямий розтяг від вмісту фібри

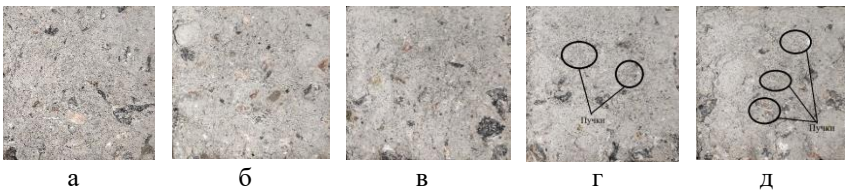


Рис.7 . Фотофіксація окремих зразків після випробування на міцність на непрямий розтяг: а – зразок без фібри; б – зразок з 0,01 % фібри; в – зразок з 0,03 % фібри; г – зразок з 0,05 % фібри; д – зразок з 0,07 % фібри

Узагальнюючі отримані результати досліджень, можна констатувати, що наявність поліпропіленових фіброволокон у складі крупнозернистої щебенево-піщаної суміші марки за міцністю М20 оказує позитивний вплив на міцнісні характеристики. Це дозволяє зробити припущення, що запропонована технологія удосконалення укріплення щебенево-піщаних сумішей покращить не лише міцнісні показники, а також морозостійкість.

Подальшими дослідженнями пропонується встановити оптимальний вміст фіброволокон окремо для піщаної частини та спробувати створити кореляційні залежності, для розрахунку оптимального вмісту фіброволокон від вмісту піщаної частини у складі суміші.

Висновки

За отриманими результатами досліджень встановлено, що додавання фіброволокон у склад укріплених цементом крупнозернистих щебенево-піщаних сумішей позитивно впливає на їх механічні властивості.

Для дослідженої суміші, за наведеними показниками, оптимальний вміст поліпропіленових фіброволокон становить 0,03 %. Найбільш інформативним показником роботи фіброволокон у складі крупнозернистої щебенево-піщаної суміші марки М20 є показник міцність на непрямої розтяг.

Подальше збільшення концентрації фіброволокон від оптимального, призводить до негативного впливу на досліджені показники та нівелює їх роботу в матеріалі, так як відбувається перенасичення суміші фіброволокнами, велика їх кількість хаотично збивається в пучки, які в кінцевому результаті, не можуть рівномірно розподілитись в структурі матеріалу і в результаті знижують показники міцності.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. Panasyuk Ya. Improved technology of soil strengthening by cement for highway construction: dis. for the degree of Candidate of Technical Sciences: specialty. 05.22.11 " Highways and airfields " / Ya. Panasyuk. Kharkiv. 2013. 190 p.
2. Sun Jian. Increasing of the durability of road pavement layers constructed using crushed stone-sand mixtures from ferruginous quartzites: dissertation for the degree of Doctor of Philosophy: specialty. 192 " Highways and airfields " / Jian Sun. Kharkiv. 2025. 212 c.

3. Brazhnyk G. Monolithic road cement concretes of high frost resistance with organomineral complex and fiber: author's abstract of the dissertation of candidate of technical sciences. UkrDAZT. G. Brazhnyk. Kharkiv. 2015. 24 p.
4. Zhang P. Shrinkage properties of cement-stabilized macadam reinforced with polypropylene fiber. P. Zhang, Q.F. Li, C.K. Huang, J Traf. Transp Eng. 2008. 8. P. 30-34.
5. Ma Y.H. Experimental research on flexural toughness of semi-rigid base mixed into polypropylene fiber. Y.H. Ma, G. Zhang, Z.J. Yi, Y.S. Zhong, B.X. Han Journal of Chongqing Jiaotong University. 2007. 4. P. 57-60.
6. Arinushkina O. Cement-reinforced gravel-sand mixtures for the construction of road surfaces. // Scientific Bulletin of Construction. Arinushkina O., Zhdanyuk V – 2016. - №1(83). – P. 120-125.
7. DSTU 9177-3:2022. Crushed stone and gravel materials for road construction. Specifications. Part 3. Materials reinforced with mineral binders [Valid from 2023-01-01]. – K.: UkrNDNC, 2023. 20 p. (State standard of Ukraine).
8. DSTU B V.2.7-46:2010. Building materials. Cements for general construction purposes. Technical conditions. [Valid from 2011-09-01]. – K.: Ministry of Regional Development and Construction of Ukraine, 2011. 15 p. (State standard of Ukraine).
9. DSTU Б V.2.7-273:2011. Building materials. Water for concrete and mortars. Technical conditions. [Valid from 2012-12-01]. – K.: Research Institute of Building Materials and Products 2012. – 14 p.
10. TC U 24.7-32781078-001:2006. Polypropylene reinforcing fiber (PRF). [Electronic resource]. Available: <http://plastificator.com.ua/cert/Fibers.pdf>. Date of application: April 28, 2017.

Література

1. Панасюк Я.І. Удосконалення технології укріплення ґрунтів цементом для будівництва автомобільних доріг: дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.22.11 "Автомобільні шляхи та аеродроми" / Я.І. Панасюк. Харків. 2013. 190 с.
2. Сунь Цзянь. Підвищення довговічності шарів дорожнього одягу влаштованих з використанням щебенево-піщаних сумішей із залізистих кварцитів: дис. на здобуття наук. ступеня доктора філософії: спец. 192 "Будівництво та цивільна інженерія" / Цзянь Сунь. Харків. 2025. 212 с.
3. Бражник Г.В. Монолітні дорожні цементні бетони високої морозостійкості з органомінеральним комплексом та фіброю : автореф. дис. канд. техн. наук. УкрДАЗТ. Г.В. Бражник. Харків. 2015. 24 с.
4. Zhang P. Shrinkage properties of cement-stabilized macadam reinforced with polypropylene fiber. P. Zhang, Q.F. Li, C.K. Huang, J Traf. Transp Eng. 2008. 8. P. 30-34.

5. Ma Y.H. Experimental research on flexural toughness of semi-rigid base mixed into polypropylene fiber. Y.H. Ma, G. Zhang, Z.J. Yi, Y.S. Zhong, B.X. Han Journal of Chongqing Jiaotong University. 2007. 4. P. 57-60.
6. Аринушкіна О.О. Укріплені цементом щебенево-піщані суміші для будівництва дорожніх одягів автомобільних доріг. // Науковий вісник будівництва. Аринушкіна О.О., Жданюк В.К. – 2016. - №1(83). – С. 120-125.
7. ДСТУ 9177-3:2022. Матеріали щебеневі та гравійні для дорожнього будівництва. Технічні умови. Частина 3. Матеріали, укріплені мінеральними в'язучими [Чинний від 2023-01-01]. – К.: УкрНДНЦ, 2023. 20 с. (Державний стандарт України).
8. ДСТУ Б В.2.7-46:2010. Будівельні матеріали. Цементи загальнобудівельного призначення. Технічні умови. [Чинний від 2011-09-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. 15 с. (Державний стандарт України).
9. ДСТУ Б В.2.7-273:2011. Будівельні матеріали. Вода для бетонів і розчинів. Технічні умови. [Чинний від 2012-12-01]. – К.: Науково-дослідний інститут будівельних матеріалів і продукції, 2012. – 14 с.
10. ТУ У 24.7-32781078-001:2006. Волокно армуюче поліпропіленове (БАП). [Електронний ресурс]. Доступно: <http://plastificator.com.ua/cert/Fibers.pdf>. Дата звернення: Квітень 28, 2017.

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 23.05.2025	Received 23.05.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 24.05.2025	Received in revised form 24.05.2025
Прийнято 01.06.2025	Accepted 01.06.2025
Опубліковано 25.06.2025	Published 25.06.2025

O. O. Arinushkina*

assistant, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-6870-3764>

Department of Highway Building and Maintenance named after O.K. Birulya
Kharkiv National Automobile and Highway University, Yaroslav Mudrogo str., 25, Kharkiv,
Ukraine, 61002

D. Yu. Kostin

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4278-2990>

Department of Highway Building and Maintenance named after O.K. Birulya
Kharkiv National Automobile and Highway University, Yaroslav Mudrogo str., 25, Kharkiv,
Ukraine, 61002

*corresponding author, e-mail:

lenaarinushkina@gmail.com

Research of the optimal concentration of polypropylene fibers in coarse-grained crushed stone-sand mixtures reinforced with cement

How to Cite:

Arinushkina, O. O., Kostin, D. Yu. (2025). Research of the optimal concentration of polypropylene fibers in coarse-grained crushed stone-sand mixtures reinforced with cement. *Modern technologies*

and methods of calculations in construction, 23, 19-30. DOI: [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-02](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-02)

Abstract. Recently crushed stone-sand mixtures are one of the most widely used road construction materials for the arrangement of base layers of road pavements in Ukraine. More and more often both mineral and combined binders are used to strengthen roads during construction, repairs and reconstruction. One of the ways to improve the properties of building materials is to reinforce them with various fibers. Analysis of literature sources has shown that the addition of fibers into the composition of cement-reinforced soils and cement concretes significantly improves the physical and mechanical properties and durability of these road-building materials.

The article presents the results of an experimental study on the establishment of the optimal content of polypropylene fibers on the physical and mechanical properties of coarse-grained crushed stone-sand mixtures reinforced with mineral binder (cement). The studies were carried out on a coarse-grained crushed stone-sand mixture reinforced with cement in an amount of 2%.

The results of the study showed that for these mixtures, according to the studied indicators, namely compressive strength and indirect tensile strength, the optimal content of polypropylene fiber with a length of 18 mm is 0.03% of the mass of the mineral part of the mixture. At these concentrations, the compressive strength limit increases by 3.4%, and the indirect tensile strength increases by 35%. It was found that a further increase in the concentration of polypropylene fibers from the optimal one leads to a negative impact on the indicators studied and levels their work in the material, as the mixture is oversaturated with fibers and a large number of them are knocked into bundles, which are unevenly distributed in the mixture and ultimately worsen the physical and mechanical indicators.

Keywords: highway, road surface, base layers, repair and construction works, fiber fibers, compressive strength, indirect tensile strength.

УДК 378.046.4

І.О. Бандура*

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2166-4909>

Кафедра електричної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

М. В. Романюк

к.т.н., доцент, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1039-1004>

Кафедра електричної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

І. В. Грицюк

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4472-306X>

Кафедра електричної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

Ю. В. Грицюк

к.т.н., доцент, <https://orcid.org/0000-0002-6463-3910>

Кафедра електричної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

Н. В. Коменда

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5944-8665>

Кафедра електричної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

В. І. Волинець

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9192-2785>

Кафедра електричної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

* автор-кореспондент, e-mail: bandura1975@i.ua

Підготовка енергоаудиторів будівель відповідно до нового професійного стандарту: стан, виклики та перспективи

Цитувати як:

Бандура І.О., Романюк М.В., Грицюк, І. В., Грицюк Ю.В., Коменда, Н. В., Волинець, В.І. (2025). Підготовка енергоаудиторів будівель відповідно до нового професійного стандарту: стан, виклики та перспективи. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 23, 31-38. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-03](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-03)

© 2025, Бандура І.О., Романюк М.В., Грицюк, І. В., Грицюк Ю.В., Коменда, Н. В., Волинець В.І.

У статті досліджено сучасний стан та тенденції розвитку професійної підготовки енергоаудиторів в Україні, з урахуванням новітніх викликів у сфері енергоефективності, декарбонізації та післявоєнного відновлення. Особливу увагу приділено аналізу професійного стандарту «Енергетичний аудитор будівель», який став базовим орієнтиром для формування навчальних програм, що відповідають вимогам європейської та національної політики у сфері енергоефективності.

Розглядаються останні публікації з тематики підготовки енергоаудиторів, які акцентують на потребі міждисциплінарного підходу, гармонізації освітніх стандартів із європейською практикою та впровадженні інноваційних форм навчання.

Центральною темою дослідження є ґрунтовний аналіз діяльності програми TEAD (Trainings for Energy Auditors & Technical Designers), що реалізується за підтримки Європейського Союзу та має на меті формування мережі кваліфікованих фахівців у галузі енергоаудиту. У роботі детально висвітлено ключові компоненти програми TEAD у 2023–2025 роках: розробка навчальних курсів відповідно до професійного стандарту, підготовка тренерів на базі провідних українських ЗВО, проведення сертифікованих тренінгів для енергоаудиторів будівель та процесів, а також впровадження принципів гендерної рівності у навчальному процесі. Проект TEAD розглядається як один із найефективніших прикладів міжнародного партнерства у зміцненні людського капіталу, для реалізації цілей сталого розвитку в Україні у співпраці з провідними європейськими та українськими експертами, що підтверджує його актуальність та відповідність сучасним вимогам. Стаття може бути корисною для освітян, дослідників, фахівців сфери енергоефективності, а також для представників державних органів, які відповідають за імплементацію політик з енергетичної модернізації.

Ключові слова: енергоефективність, підготовка енергоаудиторів, TEAD.

Вступ

Підвищення енергоефективності будівель є пріоритетним напрямом державної політики України. Відповідно до Закону України «Про енергетичну ефективність будівель», сертифікацію енергетичної ефективності можуть здійснювати лише атестовані енергоаудитори. У зв'язку з цим, виникає потреба у якісній підготовці фахівців згідно з новими професійними стандартами[1]. В Україні впровадження професійного стандарту "Енергетичний аудитор будівель" стало важливим кроком у формуванні якісного кадрового потенціалу для проведення енергоаудитів.

Аналіз останніх досліджень. У зв'язку з глобальними викликами зміни клімату, енергетичної безпеки та потребою в підвищенні ефективності використання ресурсів, в Україні останніми роками активізувалися дослідження, присвячені підготовці кваліфікованих енергоаудиторів. У науковому і фаховому середовищі формується цілісний підхід до розуміння ролі професії енергоаудитора, вимог до його компетентностей, а також механізмів якісної професійної підготовки. Аналіз наукових публікацій, монографій та аналітичних звітів останніх п'яти років дозволяє виділити декілька провідних тематичних напрямів:

Методика підготовки та сертифікації енергоаудиторів. У [2, 3] детально описано освітньо-кваліфікаційні вимоги до енергоаудиторів, роль

освітніх програм та сертифікаційних центрів у формуванні компетенцій, а також проблеми уніфікації підходів на національному рівні.

Модернізація освітніх програм і цифрові інструменти. Сучасні дослідження присвячені впровадженню BIM-технологій, енергетичного моделювання та симуляційних програм (IDA ICE, DesignBuilder, eQuest) у підготовці фахівців. Автори наголошують, що новітні цифрові інструменти є критично важливими для практичної компетентності енергоаудиторів.

Європейський досвід і його імплементація в Україні. Дослідження аналізують моделі підготовки енергоаудиторів у Німеччині, Польщі, Чехії, з акцентом на програму "Train-to-NZEB". Вони доводять ефективність партнерських програм між вишами, бізнесом і державними структурами.

Виклики підвищення кваліфікації в умовах воєнного стану. Останні публікації зосереджують увагу на трансформації форматів навчання (змішане, дистанційне), адаптації змісту курсів до потреб відновлення інфраструктури та стійкого розвитку.

У переважній більшості джерел наголошується на **недостатності уніфікованої системи сертифікації та практичної підготовки**. Попри наявність понад 20 акредитованих кваліфікаційних центрів, які готують енергоаудиторів будівель 7 рівня НРК (Національної рамки кваліфікацій), існує значна різниця в якості підготовки.

Також виявлено наступні проблеми:

нерівномірний регіональний доступ до освітніх програм (найбільше центрів у Києві, Харкові, Запоріжжі, майже відсутні — у західних областях);

низький рівень оновлення навчальних матеріалів відповідно до міжнародних норм;

недостатня мотивація викладачів і практиків до викладання через складнощі з оплатою праці та ресурсним забезпеченням;

відсутність практичної компоненти у деяких програмах (робота з реальними кейсами, термознімками, програмами енергомодельовання).

Попри виклики, більшість авторів бачать у сфері підготовки енергоаудиторів **високий потенціал розвитку**, зокрема:

- **розвиток міжвузівських кластерів** для стандартизації програм;
- **підтримка державою післядипломної освіти через гранти та пільги**;
- **інтеграція енергоаудиту до освітніх програм з архітектури, будівництва, енергоменеджменту**;
- **залучення міжнародних експертів і платформи типу EU4Energy** для підвищення якості викладання.

Метою даної роботи є: ґрунтовний аналіз діяльності програми TEAD (Trainings for Energy Auditors & Technical Designers), що реалізується за підтримки Європейського Союзу, як важливого інструменту для підготовки висококваліфікованих енергоаудиторів в Україні.

Роль програми TEAD у підготовці енергоаудиторів. У сучасних умовах, коли Україна перебуває на шляху до європейської інтеграції та трансформації енергетичного сектора, критично важливою є ефективна система підготовки висококваліфікованих фахівців у сфері енергоаудиту. Однією з ключових ініціатив, що сприяє цій меті, є програма TEAD (Training on Energy Auditing in the framework of the EU Directive), яка стала важливою платформою для впровадження європейських стандартів професійної освіти в Україні[4, 5].

Програма TEAD реалізується в межах міжнародного співробітництва між Україною та країнами Європейського Союзу за фінансової та експертної підтримки проекту EU4Energy. Основна мета TEAD — підготовка енергоаудиторів відповідно до вимог Європейської директиви 2012/27/ЄС про енергоефективність, а також впровадження належних навчальних практик для технічних експертів, що здійснюють енергетичну сертифікацію будівель. Окрім цього, програма підтримує партнерство з низкою українських вишів, Міністерством розвитку громад, міжнародними проектами GIZ та E5P, а також залучає європейські університети-партнери. Програма TEAD охоплює кілька напрямів підготовки та підвищення кваліфікації:

- **Модульна структура підготовки** — навчання базується на чітко структурованих модулях, що охоплюють як теоретичну базу (законодавство, стандарти), так і практичну частину (робота з програмним забезпеченням, проведення польових обстежень).
- **Практико-орієнтоване навчання** — важливим компонентом TEAD є симуляційні завдання, візити на реальні об'єкти, використання професійних програм для енергомодельовання (DesignBuilder, IDA ICE, PHPP).
- **Підготовка тренерів** — TEAD включає програму "train-the-trainers", що забезпечує підвищення кваліфікації викладачів закладів вищої освіти.

Протягом 2020–2023 років, за даними Міністерства розвитку громад, у межах TEAD в Україні було підготовлено понад 600 спеціалістів, з яких близько 150 — викладачі технічних університетів. Відповідно до звіту Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) учасники програми в середньому демонструють на 40% кращі результати у тестах на енергоефективне моделювання, ніж колеги, що пройшли традиційні вітчизняні курси.

Крім того, у 2023 році TEAD стала основою для створення перших відкритих онлайн-курсів з енергоаудиту українською мовою з безкоштовним доступом через платформу Prometheus[6].

TEAD значною мірою вплинула на формування нового професійного стандарту "Енергетичний аудитор будівель". Експерти, що брали участь у розробці стандарту (затвердженого у 2022 р. Міністерством економіки),

використовували матеріали TEAD як еталон для визначення обов'язкових компетентностей, зокрема:

- знання принципів енергоспоживання будівель;
- уміння застосовувати міжнародні методики (EN ISO 52000–1, ISO 13790 тощо);
- навички документування результатів у відповідності до форм ЄС.

Крім того, у межах TEAD було запропоновано створення Національного Центру кваліфікаційної підтримки енергоаудиторів, що міг би здійснювати контроль якості навчальних програм і сертифікації.

Основні досягнення TEAD у 2023–2025 роках:

1. Розробка навчальних програм. Програма TEAD розробила комплексні навчальні курси, які відповідають професійним стандартам «Енергетичний аудитор будівель» та «Енергетичний аудитор процесів». Ці курси були створені у співпраці з провідними європейськими та українськими експертами, що забезпечило їх актуальність та відповідність сучасним вимогам.

2. Підготовка тренерів. У 2024 році було проведено шеститижневий тренінг для підготовки тренерів. Цей курс підготував викладачів з провідних українських університетів, які надалі проводять навчання для чинних та майбутніх енергоаудиторів. Загалом, було залучено у якості тренерів викладачів наступних університетів: НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», НУПІ імені НУПІ ім. Ю. Кондратюка, Вінницького національного технічного університету, Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, Криворізького національного університету, НТУ "Дніпровська політехніка" та Луцького національного технічного університету.

Протягом 2024–2025 років було організовано низку безкоштовних онлайн-тренінгів для енергоаудиторів будівель та процесів. Амбітною метою реалізації Проекту TEAD (Навчання для енергоаудиторів та проєктувальників) є підготовка 1000 енергоаудиторів будівель та процесів і проєктувальників. Усі учасники, які успішно завершили навчання та склали іспити, отримали сертифікати, що підтверджують їхню кваліфікацію як енергоаудиторів. Після навчання на тренінгах, набуті професійні знання та практичні компетентності стануть основою успішної професійної атестації у кваліфікаційних центрах.

Однією з ключових цілей TEAD було залучення жінок до професії енергоаудитора. Проєкт встановив амбітну мету — забезпечити представництво жінок серед слухачів програм підготовки на рівні 50%. Це сприятиме підвищенню ролі жінок у енергетичному секторі України. Проєкт TEAD (Навчання для енергоаудиторів та проєктувальників) триватиме до серпня 2025 року.

Висновок

Програма TEAD у 2023–2025 роках зробила значний внесок у розвиток сфери енергоаудиту в Україні. Завдяки розробці сучасних навчальних програм, підготовці кваліфікованих тренерів та проведенню численних тренінгів, готується нове покоління енергоаудиторів, готових забезпечити енергоефективність у різних секторах економіки. Крім того, акцент на гендерній рівності сприяє більш широкому залученню жінок до цієї важливої професії.

Враховуючи амбітні цілі України щодо відновлення та енергомодернізації інфраструктури, TEAD вже сьогодні виконує стратегічну роль у формуванні нового покоління фахівців, які поєднують технічну експертизу, цифрові навички та європейське бачення енергоефективності та декарбонізації і сталого розвитку.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. Profesiynyi standart "Enerhetychnyi audytor budivel" [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <https://register.nqa.gov.ua/profstandart/energeticnij-auditor-budivel>
2. Denysiuk, S. P. Pidhotovka fakhivtsiv z enerhetychnoi sertyfikatsii ta obstezhennia inzhenernykh system budivel v IEE KPI im. Ihoria Sikorskoho / S. P. Denysiuk, O. V. Kotsar, M. M. Shovkaliuk // Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia : naukovyi zhurnal. – 2021. – № 1. – S. 27-32.
3. Treninhovyi posibnyk [Tekst]: dlia pidhotovky enerhoaudytoriv bahatokvartnykh zhytlovykh budivel u konteksti Fondu enerhoefektyvnosti Ukrainy / A. Cherniavskiy, V. Lytvyn, D. Marusych [ta in.] Deutsche Gesellschaft fur Internationale Zusammenarbeit (GIZ), Fond Enerhoefektyvnosti

- . – Kyiv: BVY-Print, 2021. – 400 s. : hraf., rys., fot., fot. kol. – (GIZ), Fond Enerhoefektyvnosti . – Kyiv : BVY-Print, 2021. – 400 s.
4. Treninh “Navchannia enerhoaudytoriv budivel” – Asotsiatsiia enerhoaudytoriv Ukrainy [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: Treninh “Navchannia enerhoaudytoriv budivel” – Asotsiatsiia enerhoaudytoriv Ukrainy
5. Pro Proiekt TEAD - Trainings for Energy Auditors & Technical Designershttps: <https://uatead.eu/uk/>
6. <https://prometheus.org.ua/prometheus-free/public-sector-energy-system/>

Література

1. Професійний стандарт "Енергетичний аудитор будівель" [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://register.nqa.gov.ua/profstandart/energeticnij-auditor-budivel>
2. Денисюк, С. П. Підготовка фахівців з енергетичної сертифікації та обстеження інженерних систем будівель в ІЕЕ КПП ім. Ігоря Сікорського / С. П. Денисюк, О. В. Коцар, М. М. Шовкалюк // Енергетика: економіка, технології, екологія : науковий журнал. – 2021. – № 1. – С. 27-32.
3. Тренінговий посібник [Текст]: для підготовки енергоаудиторів багатоквартирних житлових будівель у контексті Фонду енергоефективності України / А. Чернявський, В. Литвин, Д. Марусич [та ін.] Deutsche Gesellschaft fur Internationale Zusammenarbeit (GIZ), Фонд Енергоефективності . – Київ: БВИ-Прінт, 2021. – 400 с. : граф., рис., фот., фот. кол. – (GIZ), Фонд Енергоефективності . – Київ : БВИ-Прінт, 2021. – 400 с.
4. Тренінг “Навчання енергоаудиторів будівель” – Асоціація енергоаудиторів України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: Тренінг “Навчання енергоаудиторів будівель” – Асоціація енергоаудиторів України
5. Про Проект TEAD - Trainings for Energy Auditors & Technical Designershttps: <https://uatead.eu/uk/>
6. <https://prometheus.org.ua/prometheus-free/public-sector-energy-system/>

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 12.05.2025	Received 12.05.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 23.05.2025	Received in revised form 23.05.2025
Прийнято 01.06.2025	Accepted 01.06.2025
Опубліковано 25.06.2025	Published 25.06.2025

I.O. Bandura*

PhD in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2166-4909>
Department of Electrical Engineering
Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

N. V. Romanyuk,

PhD in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1039-1004>
Department of Electrical Engineering

Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

I. V. Hrytsiuk,

PhD in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4472-306X>

Department of Electrical Engineering

Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

Y. V. Hrytsiuk,

PhD in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6463-3910>

Department of Electrical Engineering

Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

N. V. Komenda

PhD in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5944-8665>

Department of Electrical Engineering

Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

V. I. Volynets

PhD in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9192-2785>

Department of Electrical Engineering

Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

*corresponding author, e-mail: bandura1975@i.ua

Training of building energy auditors by the new professional standard: status, challenges and prospects

How to Cite:

Bandura I. O., Romanyuk N. V., Hrytsiuk, I. V., Hrytsiuk, Y. V., Komenda, N. V. (2025). Training of building energy auditors by the new professional standard: status, challenges and prospects. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 23, 31-38. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-03](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-03)

The article examines the current state and trends in the development of professional training for energy auditors in Ukraine, taking into account the latest challenges in the field of energy efficiency, decarbonization, and post-war reconstruction. Particular attention is paid to the analysis of the professional standard "Energy Auditor of Buildings", which has become a basic reference point for the formation of training programs that meet the requirements of European and national policies in the field of energy efficiency. The latest publications on the topic of training for energy auditors are reviewed, which emphasize the need for an interdisciplinary approach, harmonization of educational standards with European practice, and the introduction of innovative forms of training. The central theme of the study is a thorough analysis of the activities of the TEAD (Trainings for Energy Auditors & Technical Designers) program, which is implemented with the support of the European Union and aims to form a network of qualified specialists in the field of energy auditing. The paper details the key components of the TEAD program in 2023–2025: development of training courses by the professional standard, training of trainers based on leading Ukrainian higher education institutions, conducting certified training for energy auditors of buildings and processes, and implementing the principles of gender equality in the educational process. The TEAD project is considered one of the most effective examples of international partnership in strengthening human capital, for the implementation of sustainable development goals in Ukraine in cooperation with leading European and Ukrainian experts, which confirms its relevance and compliance with modern requirements. The article may be useful for educators, researchers, energy efficiency specialists, as well as for representatives of state bodies responsible for the implementation of energy modernization policies..

Keywords: energy efficiency, training of energy auditors, TEAD.

УДК 69:658

Ю. О. Білов,

аспірант, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-2374-2632>

Кафедра промислового та цивільного будівництва,

Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні Запорізький національний університет, пр. Соборний, 226,

Запоріжжя, Україна, 69606

*автор-кореспондент, e-mail: susannapastukhova@gmail.com

Аналітико-теоретичні засади оптимізації організаційних будівельних процесів

Цитувати як:

Білов Ю. О. (2025). Дослідження аналітико-теоретичних аспектів оптимізації організаційних будівельних процесів. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 23, 39-47. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-04](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-04)

© 2025, Білов Ю. О.

Анотація. У сучасних умовах розвитку будівельної галузі спостерігається посилення потреби в комплексній трансформації організаційних процесів, що обумовлено зростанням складності інфраструктурних проєктів, нерівномірністю розподілу ресурсів, динамікою ринку та підвищенням вимог до якості й термінів виконання робіт. Результати аналізу розвитку будівельного ринку України за 2017–2022 роки засвідчили наявність низки структурних диспропорцій, зокрема між плановими обсягами будівельно-монтажних робіт і фактичною реалізацією, а також виявили регіональну асиметрію попиту, що обумовлена соціально-економічними факторами.

В умовах такої нестабільності, ефективне управління будівельною діяльністю потребує використання математичних методів, здатних враховувати багатофакторну природу процесів. Одним із перспективних напрямів удосконалення планування та координації в будівництві є застосування математичного моделювання, зокрема, алгоритмічно-критеріального підходу до параметричної оптимізації. Такий підхід дозволяє формалізовано аналізувати залежності між основними показниками реалізації проєкту: часовими характеристиками, логістикою постачання матеріалів, запасами з фіксованими інтервалами, вартістю робіт, транспортними витратами та обсягами будівельно-монтажних робіт. При цьому, математичне моделювання сприяє не лише підвищенню точності розрахунків, а й дає змогу визначити оптимальні рішення в умовах обмежених ресурсів і змінного зовнішнього середовища. Завдяки системному підходу до аналізу та планування стає можливим ефективніше керувати взаємодією між підрядними структурами, прогнозувати результати реалізації проєктів та знижувати ризики їх зриву.

Таким чином, актуальність дослідження полягає в необхідності розробки ефективного математичного інструментарію для оптимізації організаційно-

технологічних процесів у будівництві, що базується на поєднанні методів прикладної математики, системного аналізу та критеріального підходу до управління будівельним виробництвом.

Ключові слова: організаційні процеси, будівництво, організація будівельного виробництва, модель оптимізації, моделювання організаційних процесів

Вступ

Актуальність і новизна. У сучасних умовах трансформації будівельної галузі, посилення конкуренції на ринку та зростання вимог до якості, строків і вартості реалізації проєктів, особливої актуальності набуває впровадження моделей оптимізації в організаційні процеси будівництва. Це дозволяє досягти підвищення ефективності управління, забезпечити прозорість на всіх етапах життєвого циклу об'єкта, зменшити вплив людського фактору, оптимізувати використання ресурсів та скоротити строки реалізації проєктів. З огляду на складність координації процесів матеріально-технічного забезпечення, логістики та ресурсного планування в умовах динамічного ринку, впровадження організаційних моделей стає не просто інструментом модернізації, а критичною умовою забезпечення конкурентоспроможності будівельних підприємств. Таким чином, дослідження методів оптимізації будівельної галузі та їх впливу на організаційну ефективність є вкрай актуальним як у теоретичному, так і в прикладному аспекті.

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. У контексті оптимізації організаційних будівельних процесів, значна увага у сучасній науковій літературі приділяється впровадженню інформаційних технологій в організаційно-технологічні процеси та математичному моделюванню для підвищення ефективності управління будівництвом.

У роботах вітчизняних науковців, зокрема В. С. Мосейчука, С. В. Дзвінчука, Л. О. Білоконя акцентується увага на важливості застосування інструментів математичного моделювання для удосконалення процесів прийняття рішень у сфері проєктного управління. Їх роботи обґрунтовують доцільність використання алгоритмічних методів для аналізу взаємозалежних техніко-економічних показників, таких як тривалість робіт, витрати на логістику, обсяги будівельно-монтажних робіт (далі БМР).

Особливе місце в сучасних дослідженнях займають питання алгоритмічно-критеріального підходу до оптимізації, що базуються на системному аналізі багатопараметричних залежностей. У дослідженнях Ю. В. Зайцева, О. М. Ігнатенка та А. П. Левченка представлено концепції багатокритеріального вибору з використанням нечітких множин, еволюційних алгоритмів та методів машинного навчання для автоматизованого формування цільових функцій і варіативного моделювання сценаріїв.

Щодо світового досвіду, то в працях міжнародних дослідників А. Hammad, Н. Zhang, М. Bortolini чітко простежується важливість інтеграції ERP та SCM-систем у будівельне середовище, що дозволяє забезпечити повноцінну автоматизацію управління ресурсами, оптимізацію логістики та покращення координації між учасниками будівельного процесу.

Таким чином, аналіз наукових джерел свідчить про наявність сталої тенденції щодо поглиблення досліджень у сфері цифрових рішень, математичного моделювання та алгоритмічної оптимізації в будівництві. Однак, попри значний обсяг робіт, недостатньо розробленими залишаються інтегровані підходи, що поєднують прикладну математику, інформаційні технології та практичну логістику в формалізовану модель, придатну для широкого впровадження в умовах українського ринку, що й визначає наукову новизну та практичну значущість цього дослідження.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є розробка та вдосконалення математичного інструментарію алгоритмічно-критеріального моделювання параметричної оптимізації організаційно-технологічних процесів у будівництві шляхом інтеграції інформаційних технологій для аналізу взаємозв'язків між критичними параметрами: тривалістю виконання робіт, логістикою матеріальних потоків, обсягами та вартістю будівельно-монтажних робіт, а також транспортними витратами.

Матеріали та методи

Для досягнення поставленої мети у дослідженні були застосовані такі методи: метод системного аналізу, математичне моделювання, метод оптимізації, інформаційно-аналітичні методи.

Аналізуючи динаміку розвитку будівельного сектору виявлено низку системних та якісних структурних недоліків, які істотно впливають на функціонування галузі в умовах соціально-економічної трансформації.

Передусім, серед основних проблем було виявлено диспропорцію між запланованими обсягами будівельно-монтажних робіт та фактичним зростанням фізичних обсягів реалізованих об'єктів. Це свідчить про відставання темпів реалізації проектів від стратегічних цілей розвитку інфраструктури та житлового сектору. Подібне протиріччя зумовлене як внутрішніми організаційними чинниками, наприклад, неузгодженістю у плануванні, дефіцитом кваліфікованої робочої сили, обмеженістю матеріально-технічних ресурсів, так і зовнішніми факторами – коливанням інвестиційної активності, змінами в державному регулюванні та геополітичними ризиками.

Одним із ключових аспектів, що характеризують якісну деформацію ринку, є дисбаланс у структурі споживчого попиту на житло. Даний дисбаланс виникає переважно внаслідок регіональної та субрегіональної диференціації доходів населення. У більш забезпечених регіонах спостерігається перевищення попиту над пропозицією, тоді як у менш

розвинених областях попит на житло має обмежений характер, що не дозволяє досягти ефективного розподілу інвестиційних ресурсів та призводить до формування локальних диспропорцій на ринку.

У цьому контексті було обґрунтовано доцільність структуризації регіональних будівельних ринків за критерієм функціонування конкурентоспроможних підрядних підприємств. Ці підприємства відіграють роль ключових учасників системи централізованого управління будівельним комплексом, яка реалізується через механізм укладання підрядних та субпідрядних договорів. Така система дозволяє забезпечити багаторівневу інтеграцію суб'єктів будівельної діяльності, посилює взаємозв'язок між основними й допоміжними виконавцями робіт, а також створює передумови для реалізації ефективної моделі проєктного менеджменту в будівництві.

У сучасних умовах трансформації економіки та зростаючих вимог до ефективності будівельної діяльності впровадження новітніх інформаційних технологій в організаційні процеси будівництва є ключовим чинником підвищення конкурентоспроможності підприємств галузі. Цифровізація виступає не лише інструментом автоматизації й оптимізації процесів, але й чинником стратегічного управління, який забезпечує інтеграцію всіх етапів життєвого циклу будівельного проєкту в єдиний інформаційний простір. Завдяки цьому досягається суттєве підвищення продуктивності, зниження загальних витрат, покращення якості проєктного та виконавчого контролю, а також значне скорочення строків реалізації будівельних проєктів.

Цифрові технології створюють умови для гнучкого реагування на змінні зовнішні умови, дозволяють оперативнo коригувати планування й зменшують імовірність виникнення ризиків на різних етапах виконання будівельних робіт. Прозорість і простежуваність кожної операції в межах реалізації проєкту формують підґрунтя для формування ефективної системи корпоративного управління та посилення довіри з боку інвесторів і замовників.

Організація матеріально-технічного забезпечення будівельних об'єктів є однією з найважливіших складових управління будівельним виробництвом. Вона охоплює процеси стратегічного планування постачань, оперативного управління закупівлями, організації транспортування та зберігання матеріалів й обладнання. Забезпечення безперебійного постачання ресурсів до будівельного майданчика вимагає високого рівня координації між усіма залученими сторонами – постачальниками, логістичними компаніями, технічними службами, підрядниками та субпідрядниками.

Використання систем управління ланцюгами постачання (SCM – Supply Chain Management) дозволяє досягти високого рівня оптимізації цих процесів, зменшити логістичні втрати, підвищити точність виконання графіків постачання, а також забезпечити прозорість й аналітичну

підтримку прийняття рішень. Впровадження SCM-технологій сприяє формуванню адаптивної системи логістики, здатної швидко реагувати на зміни в умовах реалізації проєкту та мінімізувати ризики порушення термінів.

Результати та обговорення

У процесі розробки математичного інструментарію для алгоритмічно-критеріального моделювання параметричної оптимізації в будівельному виробництві особлива увага була приділена використанню сучасних інформаційних технологій. Такий підхід дозволяє ефективно аналізувати взаємозалежності між ключовими параметрами, що безпосередньо впливають на ефективність організації та реалізації будівельно-монтажних робіт (БМР). До таких параметрів належать: календарний час реалізації проєкту, особливості розподілу матеріальних потоків, формування та утримання запасів матеріалів за умови фіксованої періодичності поставок, вартість виконання БМР, транспортні витрати, а також обсяги будівельно-монтажних робіт у динаміці (Рис.1).



Рис.1. Процес дослідження розробки математичного інструменту алгоритмічно-критеріальної оптимізації

Запропонована концепція алгоритмічно-критеріального моделювання базується на системному підході до опису й оптимізації

багатофакторних процесів будівництва. Використання інформаційних технологій у поєднанні з методами прикладної математики дозволяє створити адаптивну модель, яка не лише відображає реальні умови функціонування об'єкта, але й забезпечує можливість варіативного моделювання сценаріїв з урахуванням зміни вхідних параметрів. Особливе значення у цьому контексті має вибір форми цільової функції, що задає критерії оптимальності та орієнтує процес пошуку найкращих управлінських рішень у межах заданих ресурсних обмежень.

Проведені математичні розрахунки підтвердили високу ефективність обраної методології як у контексті оптимізації техніко-економічних показників реалізації проєкту, так і в аспекті покращення логістичної та часової координації будівельних процесів. Концепція продемонструвала надійність у відображенні складних залежностей між параметрами системи та гнучкість у пристосуванні до різних масштабів проєктів. Таким чином, модель може бути використана як основа для прийняття обґрунтованих управлінських рішень у процесі планування, організації та моніторингу будівельної діяльності.

Висновки

Оптимізація організаційних процесів у будівельному виробництві базується на системному підході та враховує ключові критерії ефективного управління підприємством. Щоб прийняти обґрунтоване рішення щодо вибору теоретичних і методологічних основ оптимізації, необхідно враховувати зовнішні чинники, які впливають на діяльність підприємства на ринку будівництва.

Запропонований підхід, що базується на логістиці централізованій координації, передбачає модифікацію принципів розподілу матеріально-технічних ресурсів з урахуванням актуального попиту та реальних потреб регіонів. Це, у свою чергу, дозволяє підвищити результативність планування, забезпечити стабільну логістику постачання ресурсів, зменшити витрати на реалізацію об'єктів і вивести будівельну діяльність на якісно новий рівень координації.

У підсумку, формування ефективного механізму управління регіональними ринками підприємств та ресурсами сприятиме адаптації будівельного комплексу до викликів часу, підвищить конкурентоспроможність підприємств і забезпечить стабільний розвиток будівельної галузі в Україні в середньо- та довгостроковій перспективі.

Конфлікти інтересів

Автор заявляє, що у нього немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. Simak S. V. Theoretical and methodological foundations of the study of investment and construction complex management. *Scientific notes of the Tavria National University named after V. I. Vernadsky. Ser. State Administration*. 2021. No. 4, vol. 32(71). pp. 17–22.
2. Scientific and theoretical platform for activating and developing construction in Ukraine: monograph / I. A. Harutyunyan et al.; ed. I A. Harutyunyan. Zaporizhzhia: ZNU, 2020. 211 p.
3. Komelina O. V., Kharchenko Yu A., Lysenko M. V. Approaches to modeling the development of the construction industry in the context of increasing global challenges. *Building innovations: collection of scientific papers based on materials of the III International Azerbaijani-Ukrainian Scientific and Practical Conference, June 1–2. 2020 – Poltava: Yuriy Kondratyuk National University, 2020. P. 452–455.*
4. Dankevych N. O. Increasing the effectiveness of organizational decisions as part of a construction organization project. *Bridges and tunnels: theory, research, practice*. 2019. Issue 16. P. 38–43.
5. Innovative technology for assessing the quality of management of construction contracting enterprises / V. O. Pokolenko et al. *Management of complex systems development*. 2017. Issue 32. P. 146–152.
6. DBN A.3.1-5-2016 Organization of construction production [Actual from 01.01.2016]. Kyiv: Minregionalbud of Ukraine, 2016. 49 p.
7. Mishra S., Soumya Sahoo S., Das M.. Genetic algorithm: an efficient tool for global optimization. *Advances in Computational Sciences and Technology*. 2017. Vol. 10, No. 8. P. 2201–2211.
8. Database optimization using genetic algorithms for distributed / Aponsoa G. C. A. L. and others. *Databases International Journal of Computer*. 2017. Vol. 24, No. 1. P. 23–27.
9. Saieg P., Sotelino E. D., Nascimento D., Caiado R. G. G. Interactions of building information modeling, lean and sustainability on the architectural, engineering and construction industry: a systematic review. *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 174. P. 788–806.

Література

1. Сімак С. В. Теоретико-методологічні основи дослідження управління інвестиційно-будівельним комплексом. *Вчені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського. Сер. Держ. управління*. 2021. № 4, т. 32(71). С. 17–22.
2. Науково-теоретична платформа активізації та розвитку будівництва України : монографія / І. А. Арутюнян та ін. ; за ред. І. А. Арутюнян. Запоріжжя : ЗНУ, 2020. 211 с.
3. Комеліна О. В., Харченко Ю. А., Лисенко М. В. Підходи до моделювання розвитку будівельної галузі в умовах посилення глобальних викликів. *Building innovations*: зб. наук. пр. за матеріалами III Міжнар. азерб.-укр. наук.-практ. конф., 1–2 черв. 2020 р. – Полтава : Національний університет ім. Юрія Кондратюка, 2020. С. 452–455.
4. Данкевич Н. О. Підвищення ефективності організаційних рішень у складі проекту організації будівництва. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2019. Вип. 16. С. 38–43.
5. Інноваційна технологія оцінки якості менеджменту будівельних підприємств / В. О. Поколенко та ін. *Управління розвитком складних систем*. 2017. Вип. 32. С. 146–152.
6. ДБН А.3.1-5-2016 Організація будівельного виробництва [Чинний від 1.01.2016]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2016. 49 с.
7. Mishra S., Soumya Sahoo S., Das M.. Genetic algorithm: an efficient tool for global optimization. *Advances in Computational Sciences and Technology*. 2017. Vol. 10, № 8. P. 2201–2211.
8. Database optimization using genetic algorithms for distributed / Aponsoa G. C. A. L. and others. *Databases International Journal of Computer*. 2017. Vol. 24, № 1. P. 23–27.
9. Saieg P., Sotelino E. D., Nascimento D., Caiado R. G. G. Interactions of building information modeling, lean and sustainability on the architectural, engineering and construction industry: a systematic review. *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 174. P. 788–806.

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 22.04.2025	Received 22.04.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 23.05.2025	Received in revised form 23.05.2025
Прийнято 01.06.2025	Accepted 01.06.2025
Опубліковано 25.06.2025	Published 25.06.2025

Yu. O. Bilov,

postgraduate student, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-2374-2632>

Department of Industrial and Civil Engineering,

Y. M. Potebna Engineering Educational and Scientific Institute, Zaporizhia National University,
Sobornyi Ave., 226,
Zaporizhia, Ukraine, 69606

*corresponding author, e-mail: susannapastukhova@gmail.com

Analytical and theoretical principles of optimizing organizational construction processes

How to Cite:

Bilov Yu. O. (2025). Research into analytical and theoretical aspects of optimizing organizational construction processes. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 23, 39-47. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-04](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-04)

Abstract. In the current conditions of the construction industry, there is an increasing need for a comprehensive transformation of organizational processes, which is due to the increasing complexity of infrastructure projects, uneven distribution of resources, market dynamics, and increased requirements for the quality and timing of work. The results of the analysis of the development of the construction market of Ukraine for 2017–2022 showed the presence of several structural imbalances, in particular between the planned volumes of construction and installation works and actual implementation, and also revealed regional asymmetry of demand, which is due to socio-economic factors.

In conditions of such instability, effective management of construction activities requires the use of mathematical methods that can take into account the multifactorial nature of processes. One of the promising areas for improving planning and coordination in construction is the use of mathematical modeling, in particular, the algorithmic-criteria approach to parametric optimization. This approach allows for a formal analysis of the dependencies between the main indicators of project implementation: time characteristics, logistics of material supply, fixed-interval inventories, cost of work, transportation costs, and volumes of construction and installation works. At the same time, mathematical modeling contributes not only to increasing the accuracy of calculations but also makes it possible to determine optimal solutions in conditions of limited resources and a changing external environment. Thanks to a systematic approach to analysis and planning, it becomes possible to more effectively manage the interaction between contracting structures, predict the results of project implementation, and reduce the risks of their failure.

Thus, the study's relevance lies in the need to develop effective mathematical tools for optimizing organizational and technological processes in construction, based on a combination of methods of applied mathematics, systems analysis, and a criteria-based approach to construction production management.

Keywords: organizational processes, construction, organization of construction production, optimization model, modeling of organizational processes

УДК 711.4

Н.І. Білошицька,

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8840-2885>

Г.О. Татарченко,

д.т.н., професор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4685-0337>

М.В. Білошицький,

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9935-4161>

П.Є. Уваров,

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3310-5719>

кафедра будівництва, урбаністики та просторового планування

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, вул. Іоанна Павла II, 17,
м. Київ, 01042, Україна.

*автор-кореспондент, e-mail: beloshitska@ukr.net

Шляхи повоєнної відбудови транспортної інфраструктури

Цитувати як:

Білошицька, Н. І., Татарченко, Г. О., Білошицький, М. В., Уваров, П. Є. (2025). Шляхи повоєнної відбудови транспортної інфраструктури. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 23, 48-56. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-05](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-05)

© 2025, Білошицька Н.І., Татарченко Г.О., Білошицький М.В., Уваров П.Є.

Анотація. Концепція сталої мобільності почала поширюватися наприкінці 90-х років минулого століття одночасно з концепцією сталого розвитку, і як одна з її складових. Вперше термін «стала мобільність» почав використовуватися у 2000-х роках. Транспортна інфраструктура є головною сполучною ланкою всіх районів міста, забезпечує зв'язок між регіонами та має стати одною з основних рушійних сил у повоєнній відбудові України. Однією з найважливіших тенденцій розвитку міст є перехід до формування сталої транспортної інфраструктури, основними завданнями якої є: зниження попиту на приватний транспорт та стимулювання використання більш енергоефективних та екологічно чистих видів громадського транспорту (тролейбус, трамвай). КП «Севєродонецьке тролейбусне управління» ще до початку 2022 року почало впроваджувати концепцію екологічно чистого транспортного перевізника.

Автомобільні мости завжди відігравали стратегічну роль, але під час бойових дій їх значення в транспортному сполученні стало критичним, оскільки вони були частково або повністю зруйновані. Руйнування транспортної інфраструктури, особливо автомобільних мостів, які є основним засобом сполучення для мешканців міста Сіверськодонецьк, оскільки його мешканці мають залізничне сполучення тільки з Лисичанська та Рубіжного, де є залізничні станції. З 2014 року на території Луганської області ведуться бойові дії. Міста Сіверськодонецьк, Рубіжне та Лисичанськ утворюють Лисичансько-Сіверськодонецьку агломерацію, сполучення всередині якої здійснюється двома автомобільними мостами через річки Сіверський Донець та Борова. У 2014 році вони стали непридатними для використання. Проекти з відновлення автомобільних

мостів через річки Сіверський Донець та Борова та прокладання безконтактних тролейбусних маршрутів є дуже важливим фактором відновлення міст регіону та формування сталої транспортної інфраструктури цієї агломерації.

Ключові слова: місто, сталий розвиток, стала мобільність, транспортна інфраструктура, відновлення.

Вступ

Стійкий транспорт – це одна із складових концепції сталого розвитку міста. Транспорт забезпечує виробничі зв'язки промисловості та сільського господарства, здійснює перевезення вантажів та пасажирів, є основою географічного поділу праці, сприяючи спеціалізації та кооперуванню підприємств, галузей, районів та країн. Без транспорту було б неможливим подолання територіального розриву між виробництвом та споживанням товарів та послуг [1]. Внаслідок бойових дій значних втрат зазнала транспортна інфраструктура – \$38,5 млрд [2, 3] и потребує значного відновлення.

Сталий розвиток транспорту – це керований розвиток, основою реалізації якого є системний підхід та сучасні інформаційні технології, які дають змогу з високою точністю прогнозувати їхні результати та вибрати найбільш оптимальні напрями розвитку.

Таким чином, актуальним постало питання щодо планування заходів з комплексного відновлення та трансформації транспортної інфраструктури як на постраждалих в наслідок обстрілів територіях, так і в цілому по країні з метою побудови сталої транспортної інфраструктури.

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Численні дослідження показали, що в Україні і до 2022 року існував ряд проблем у розвитку транспортної інфраструктури. Авторами [4] досліджено вплив системних соціальних потрясінь, які відбувалися в Україні з початку 2014 р. і до тепер, та завдали значних прямих та непрямих економічних збитків та руйнувань інфраструктури.

У роботі [5] досліджено сучасний стан та пропонуються шляхи розвитку транспортної інфраструктури: трансформація функціонування існуючої та впровадження нових напрямків розвитку, а саме застосування концепції Smart City.

Дослідження стану транспортної інфраструктури після руйнувань, та вивчення існуючих стратегічних напрямків і досвіду у її відновленні, зокрема мостових споруд, є важливим фактором сталого розвитку міст та економіки країни в цілому [6].

Також пропонується особливу увагу сконцентрувати на проблемах управління трафіком, концепції «міста 15 хв» та принципах дизайну вулиць, які визначають майбутнє сталого розвитку міст [7].

З метою відновлення транспортної системи, постраждалої у результаті бойових дій, розбудови відповідно до політик та стандартів ЄС,

зокрема вимог сталої, розумної, інклюзивної та стійкої до криз мобільності, інтегрованого до світової транспортної мережі було розроблено проєкт Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року [8].

Метою дослідження є визначення шляхів відновлення транспортної інфраструктури міст України відповідно до концепції сталого розвитку, зокрема на прикладі м. Сіверськодонецьк (у минулому Северодонецьк).

Результати та обговорення

Концепція сталої мобільності почала поширюватися наприкінці 90-х років минулого століття одночасно з концепцією сталого розвитку, і як одна з її складових. Вперше термін «стала мобільність» (sustainable mobility) починає використовуватися у 2000-х роках [9].

Плани сталої міської мобільності (ПСММ) – це інструменти планування для міст й досягнення сталої мобільності. Концепція ПСММ розроблена Європейською Комісією, і на європейському рівні передбачено багато заходів підтримки, щоб допомогти містам перейти до більш сталих транспортних рішень [10].

Однією з найважливіших тенденцій міського розвитку є перехід до формування стійкої транспортної інфраструктури, основними завданнями якої є: зменшення попиту на приватний транспорт та заохочення до користування громадськими більш енергоефективними та екологічно чистими видами транспорту (тролейбус, трамвай).

Ще до початку 2022 року КП «Северодонецьке тролейбусне управління» розпочало втілювати концепцію перевізника екологічно чистого транспорту. Проєкт «Єдина тролейбусна система в Лисичансько-Северодонецькій агломерації» передбачав прокладання 22 км контактних ліній, будівництво чотирьох тяглових підстанцій та придбання 50 нових тролейбусів (рис. 1) [11]. Наприкінці 2021 року безконтактні тролейбуси вже проходили обкатку маршруту у тестовому режимі по Северодонецьку.

Тому проєкт «Відновлення пасажирських перевезень» є втіленням концепції 100% екологічно чистого транспорту з організацією маршрутів без прив'язки до колії або мережі. У проєкті розглядається можливість придбання 20 електроавтобусів із запасом ходу від 200 км та зарядних пристроїв до них потужністю 120 кВт/год. Цей проєкт дасть змогу швидко вирішити питання організації перевезень усіх верств населення та забезпечити економію міського бюджету на утримання цього транспорту.

Автомобільні мости завжди виконували стратегічну роль, але під час бойових дій їх значимість у транспортному сполученні стала критичною, оскільки вони частково або повністю були зруйновані.



Рис. 1. Презентація проекту «Єдина тролейбусна система в Лисичансько-Сіверськодонецькій агломерації» [11]

Починаючи з 2014 р. на території Луганської області велися бойові дії. Міста Сіверськодонецьк, Рубіжне та Лисичанськ утворюють Лисичансько-Сіверськодонецьку агломерацію, сполучення у середині якої відбувається двома автомобільними мостами через річки Сіверський Донець та Борова [12]. У 2014 році вони стали непридатними для використання. Найбільш пошкодженою була інженерно-транспортна інфраструктура в районі існуючого автомобільного мосту через річку Борова, яким відбувалося сполучення між містами Сіверськодонецьк та Рубіжне (рис. 2). Тому, протягом 2015-2016 рр. було проведено його реконструкцію.

У ході бойових дій у 2022 р. було пошкоджено автомобільний міст (Пролетарський) на автомобільній дорозі, що поєднує міста Лисичанськ та Сіверськодонецьк. Загальна довжина об'єкту складає 243,0 м (рис. 3, 4).

Автомобільний міст є важливим інфраструктурним логістичним об'єктом стратегічного значення який зв'яже західну та східну частини Луганської області, має велике соціально-економічне значення для розвитку східних областей України.

Реконструкція автомобільного мосту сприятиме відновленню шляхів логістики та пасажирських перевезень, відновленню ділової активності в регіоні, відбудові промислових підприємств та підприємств вугільної промисловості в пост військовий період.



а



б

Рис. 2. Міст через ріку Борова: а – до реконструкції; б – після реконструкції

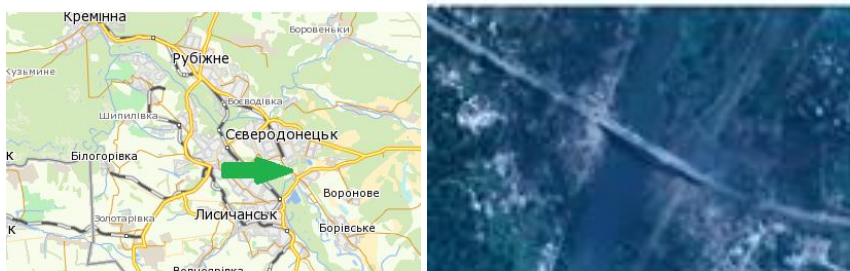


Рис. 3. Розміщення об'єкта реконструкції – міст



Рис. 4. Зруйнований міст між Сіверськодонецьком та Лисичанськом

Реконструкція мосту передбачає роботи по монтажу та закріпленню залізо-бетонних конструкцій та елементів, реконструкції несучих опор:

- монтаж мостових залізо-бетонних прольотів;
- проведення монолітно-бетонних робіт з будівництва проїзної та пішохідної частини мосту;
- монтаж огорожі (перила), ліхтарів освітлення та інших металоконструкцій;
- укладання дорожнього покриття (бетон, асфальтобетон).

Висновки

Руйнування транспортної інфраструктури, особливо автомобільних мостів, які є основним видом транспорту для мешканців м. Сіверськостаніславська, оскільки залізничне сполучення його мешканців відбувається з Лисичанська та Рубіжного, де є залізничні станції. Проєкти відбудови автомобільних мостів через річки Сіверський Донець та Борова та прокладання маршрутів безконтактного тролейбусу є дуже важливим фактором у відновленні міст регіону та націлені на формування сталої транспортної інфраструктури даної агломерації.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

- 1.Reasons Why Access to Transport is so Important. URL: <https://epicentrk.ua/shop/svetilnik-tochechnyy-maxus-3-step-1-max-01-3-sdl-12-c-12-vt-3000-3500-4100-k-belyy.html>
- 2.Priami zbytky infrastruktury Ukrainy cherez viinu zrosly do \$170 mlrd – otsinka KSE Institute stanom na lystopad 2024 roku. URL: <https://kse.ua/ua/about-the-school/news/pryami-zbitki-infrastrukturi-ukrayini-cherez-viynu-zrosli-do-170-mlrd-otsinka-kse-institute-stanom-na-listopad-2024-roku/>
3. Zbytky infrastruktury Ukrainy vnaslidok povnomasshtabnoi viiny siahnuly \$170 miliardiv. Shcho postrazhdalo naibilshe? URL: <https://censor.net/n3535865>

4. Shevchenko R.B., Ivashchenko T.O. Stahnatysia transportnoi haluzi Ukrainy yak rezultat systemnykh sotsialnykh potriasin // Problemy suchasnykh transformatsii. Seriia: ekonomika ta upravlinnia. № 11. 2024. – 12 s. URL: <https://reicst.com.ua> > pmt > article > download
5. Charkina T.Iu., Zadoia V.O., Yurchyk O.A. Suchasnyi stan ta perspektyvy rozvytku vidnovlennia i rozbudovy transportnoi infrastruktury v Ukraini // Ahrosvit, 2024. – №6. – S. 103-112. URL: <https://www.nayka.com.ua/index.php/agrosvit/article/view/3213/3249>
6. Koba V.H., Semenchuk T.B., Zaiachuk R.V. Vidnovlennia transportnoi infrastruktury Ukrainy: vyklyky ta mozhlyvosti u pisliavoiennyi period // Natsionalni interesy Ukrainy, 2025. – №3 (8). – S. 812-824. URL: <http://perspectives.pp.ua/index.php/niu/article/view/21322/21297>
7. Dudar I.N., Brychanskyi A.O. Suchasni pidkhody do vidnovlennia ta rozvytku mist pislia viiny // Naukovo-tekhnichnyi zhurnal «Suchasni tekhnolohii, materialy i konstruksii v budivnytstvi». Miske budivnytstvo ta arkhitektura, 2023. – S. 153-158. DOI 10.31649/2311-1429-2023-2-153-158
8. Proiekt Natsionalnoi transportnoi stratehii Ukrainy. URL: https://mtu.gov.ua/files/Dodatok_1_2_Proiekt_Natsionalnoi_transportnoi_stratehii_Ukrainy.pdf
9. Shcho take stala mobilnist. URL: <https://enefcities.org.ua/diynalist/mobilnist/>
10. Sustainable Urban Mobility Plans. A Policy Brief from the Policy Learning Platform on Low-Carbon Economy. URL: <https://www.intergeurope.eu/sites/default/files/2021-12/Policy%20brief%20on%20sustainable%20urban%20mobility%20plans.pdf>
11. «Iakby ne bulo viiny»: plany, mrii ta nadii Sievierodonetska ta Lysychanska, yakym ne sudylosia zdiisnytsia, - Chas Pik. URL: https://sed-rada.gov.ua/novini/yakbi-ne-bulo-viyni-plani-mriyi-ta-nadiyi-sievierodonecka-ta-lisichanska-yakim-ne-sudilosya-zdiysnitysya-chas-pik_16-04-2024
12. Tatarchenko G.O., Biloshytska N.I., Biloshytsky M.V., Uvarov P.Y. Residual Life Cycle of the Motorway Bridge. Proceedings of the 2nd International Conference on Building Innovations. ICBI 2019. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 73. pp 473-481 Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42939-3_47

Література

1. Reasons Why Access to Transport is so Important. URL: <https://epicentrk.ua/shop/svetilnik-tochecnyy-maxus-3-step-1-max-01-3-sdl-12-c-12-vt-3000-3500-4100-k-belyy.html>
2. Прямі збитки інфраструктури України через війну зросли до \$170 млрд – оцінка KSE Institute станом на листопад 2024 року. URL: <https://kse.ua/ua/about-the-school/news/pryami-zbitki-infrastrukturi-ukrayini-cherez-viynu-zrosli-do-170-mlrd-otsinka-kse-institute-stanom-na-listopad-2024-roku/>
3. Збитки інфраструктури України внаслідок повномасштабної війни сягнули \$170 мільярдів. Що постраждало найбільше? URL: <https://censor.net/n3535865>
4. Шевченко Р.Б., Іващенко Т.О. Стагнація транспортної галузі України як результат системних соціальних потрясінь // Проблеми сучасних трансформацій. Серія: економіка та управління. № 11. 2024. – 12 с. URL: <https://reicst.com.ua> > pmt > article > download

5. Чаркіна Т.Ю., Задоля В.О., Юрчик О.А. Сучасний стан та перспективи розвитку відновлення і розбудови транспортної інфраструктури в Україні // Агросвіт, 2024. – №6. – С. 103-112. URL: <https://www.nayka.com.ua/index.php/agrosvit/article/view/3213/3249>
6. Коба В.Г., Семенчук Т.Б., Заячук Р.В. Відновлення транспортної інфраструктури України: виклики та можливості у післявоєнний період // Національні інтереси України, 2025. – №3 (8). – С. 812-824. URL: <http://perspectives.pp.ua/index.php/niu/article/view/21322/21297>
7. Дудар І.Н., Бричанський А.О. Сучасні підходи до відновлення та розвитку міст після війни // Науково-технічний журнал «Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві». Міське будівництво та архітектура, 2023. – С. 153-158. DOI 10.31649/2311-1429-2023-2-153-158
8. Проект Національної транспортної стратегії України. URL: https://mtu.gov.ua/files/Додаток_1_2_Проект_Національної_транспортної_стратегії_України.pdf
9. Що таке стала мобільність. URL: <https://enefcities.org.ua/divalnist/mobilnist/>
10. Sustainable Urban Mobility Plans. A Policy Brief from the Policy Learning Platform on a Low-Carbon Economy. URL: <https://www.interregeurope.eu/sites/default/files/2021-12/Policy%20brief%20on%20sustainable%20urban%20mobility%20plans.pdf>
11. «Якби не було війни»: плани, мрії та надії Северодонецька та Лисичанська, яким не судилося здійснитися, - Час Пік. URL: https://sed-rada.gov.ua/novini/yakbi-ne-bulo-viyini-plani-mriyi-ta-nadiyi-sievierodonecka-ta-lisichanska-yakim-ne-sudilosya-zdiysnitsiya-chas-pik_16-04-2024
12. Tatarchenko G.O., Biloshytska N.I., Biloshytskyi M.V., Uvarov P.Y. Residual Life Cycle of the Motorway Bridge. Proceedings of the 2nd International Conference on Building Innovations. ICBI 2019. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 73. pp 473-481 Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42939-3_47

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 19.05.2025	Received 19.05.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 03.06.2025	Received in revised form 03.06.2025
Прийнято 04.06.2025	Accepted 04.06.2025
Опубліковано 25.06.2025	Published 25.06.2025

N. Biloshytska,

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8840-2885>

H. Tatarchenko,

D.Sc. in Engineering, Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4685-0337>

M. Biloshytskyi,

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9935-4161>

P. Uvarov,

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3310-5719>

Department of civil engineering, urbanism and spatial planning

Source: <https://snu.edu.ua/index.php/en/faculty-of-transport-and-construction/>

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 17 Ioanna Pavla Druhocho Vulytsia, Kyiv, 01042, Ukraine

*corresponding author, e-mail: [e-mail: beloshitska@ukr.net](mailto:beloshitska@ukr.net)

Ways of post-war reconstruction of transport infrastructure

How to Cite:

N. Biloshytska, H. Tatarchenko, M. Biloshytskyi, P. Uvarov (2025). Ways of post-war reconstruction of transport infrastructure. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 23, 48-56. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-06](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-06)

The concept of sustainable mobility began to spread in the late 90s of the last century, simultaneously with the concept of sustainable development, and as one of its components. For the first time, the term "sustainable mobility" began to be used in the 2000s. Transport infrastructure is the main connecting link of all districts of the city, provides communication between regions, and should become one of the main drivers in the post-war reconstruction of Ukraine. One of the most important trends in urban development is the transition to the formation of a sustainable transport infrastructure, the main tasks of which are: reducing the demand for private transport and encouraging the use of more energy-efficient and environmentally friendly public transport modes (trolleybus, tram).

Even before the beginning of 2022, the KP "Severodonetsk Trolleybus Management" began to implement the concept of an environmentally friendly transport carrier. Road bridges have always played a strategic role, but during the hostilities, their importance in transport communication became critical, as they were partially or destroyed. The destruction of transport infrastructure, especially road bridges, which are the main means of communication for residents of the city of Siversko-Donetsk, as its residents have rail connections from Lysychansk and Rubizhne, where there are railway stations. Since 2014, hostilities have been taking place in the territory of the Luhansk region. The cities of Siversko-Donetsk, Rubizhne, and Lysychansk form the Lysychansk-Siversko-Donetsk agglomeration, the connection within which is carried out by two road bridges across the Siversko-Donetsk and Borova rivers. In 2014, they became unusable. Projects to rebuild automobile bridges across the Siverskyi Donets and Borova rivers and to lay contactless trolleybus routes are a very important factor in the restoration of the region's cities and the formation of a sustainable transport infrastructure of this agglomeration.

Keywords: city, sustainable development, sustainable mobility, transport infrastructure, restoration.

УДК 699.841

О.В. Бондаренко

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9056-2802>

Кафедра Залізобетонних конструкцій та транспортних споруд
Одеська державна академія будівництва та архітектури, вул. Дідріхсона, 4, Одеса, Україна, 65029

О.Ф. Майстренко*

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2941-4149>

Кафедра Залізобетонних конструкцій та транспортних споруд
Одеська державна академія будівництва та архітектури, вул. Дідріхсона, 4, Одеса, Україна, 65029

Т.І. Марченко

інженер-консультант, ТОВ «ТЕХНАГЛЯДБУД», вул. Дідріхсона, 27, офіс 1, Одеса, Україна, 65029

О.М. Іванова

головний інженер, КП «БУДОВА», вул. Осипова, 25, Одеса, Україна, 65012

*автор-кореспондент, e-mail: maystrenkoof@gmail.com

Проблеми експлуатаційної надійності монолітних будівель та споруд при недотриманні вимог послідовного бетонування

Цитувати як:

Бондаренко, О. В., Майстренко, О. Ф., Марченко, Т. І., Іванова, О. М. (2025). Проблеми експлуатаційної надійності монолітних будівель та споруд при недотриманні вимог послідовного бетонування. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 23, 57-65. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-06](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-06)

© 2025, Бондаренко, О. В., Майстренко, О. Ф., Марченко, Т. І., Іванова, О. М.

Анотація. Одним із найважливіших процесів при зведенні будівлі є послідовне бетонування конструкцій. Але фактично зведення будівлі виконується поступово, отже, на стиках конструкцій виникають зони, де при технологічному процесі виконують перерви в бетонуванні, що призводить до виникнення тонкого шару цементної плівки, який не відповідає технічним характеристикам бетону та повинен бути видалений перед укладанням бетонної суміші наступного шару. Як показує практика, будівельники не завжди виконують дані вимоги, що може призвести до аварійних випадків. У статті наведені випадки, що виявляли автори на будівельних майданчиках.

На одному з будівельних майданчиків був проведений огляд конструкцій, підготовлених до закриття опалубкою та подальшого бетонування. Було зафіксовано, що на поверхні плити перекриття цементна плівка не захищалася, а на поверхню плити, в зоні перерізу стін, натекло мастила, яким змащували опалубку. В іншому випадку інженер з авторського нагляду зафіксував ситуацію, коли цементна плівка не була захищена і залишився будівельний бруд. Ще один приклад: бетонування колон на одній з ділянок було призупинено і розкрита опалубка. На поверхні бетону в зоні перерізу колони було виявлено багато залишків

після зварювальних робіт й не була захищена цементна плівка.

У всіх цих випадках після укладання бетонної суміші в конструкцію та її затвердіння умови суцільності бетону не були дотримані. Як показала практика, з часом це може призвести до аварії. Далі, як приклад, наведено ситуацію на одній з котельнь міста Одеси, де у 2023 році трапилась аварія із руйнацією димової труби. Після огляду зруйнованих частин труби було зафіксовано, що руйнування відбувалося чітко вздовж швів бетонування. Як показало обстеження, однією з причин аварії була відсутність грамотної організації «холодного шва» бетонування.

Отже, під час проведення бетонних робіт важливо забезпечити відсутність перерв під час заливання бетону та забезпечити контроль за виконанням робіт, а також ретельно пояснити інженерам та робітникам важливість підготовки поверхні під час заливання бетону.

Ключові слова: залізобетонні конструкції, експлуатаційна надійність, аварійний стан, шов бетонування, опалубка.

Вступ

Аналіз літературних джерел і постановка проблеми. Експлуатаційна конструктивна надійність є найважливішим критерієм життєвого циклу монолітних будівель і споруд. Під терміном "експлуатаційна конструктивна надійність", як правило, розуміють можливість будівлі або споруди відповідати проєктним характеристикам напротязі всього життєвого (експлуатаційного) циклу.

Для відповідності вимогам експлуатаційної придатності конструкція повинна мати такі початкові властивості, щоб із «належним ступенем надійності для різних розрахункових впливів не утворювалися або надмірно не розкривалися тріщини, а також не виникали надмірні переміщення, коливання та інші пошкодження, які ускладнюють нормальну експлуатацію (порушення вимог комфорту щодо перебування людей, до зовнішнього вигляду конструкції, технологічних вимог за умов нормальної роботи обладнання, механізмів, конструктивних вимог щодо спільної роботи елементів та інших вимог, встановлених для проєктування» [1].

Для дотримання вимог безпеки конструкції повинні мати такі початкові властивості, щоб із необхідним ступенем надійності для різних розрахункових ситуацій у процесі будівництва та експлуатації будівель і споруд була виключена можливість руйнування будь-якого характеру або порушення експлуатаційної придатності, пов'язаних із завданням шкоди для життя або здоров'я людини, майна або навколишнього середовища [1].

Щоб будівля або споруда відповідала цим критеріям, необхідно дотримуватись усіх вимог нормативних документів, технічних регламентів, технологічних карт тощо.

Розрахунок залізобетонних, а також бетонних конструкцій повинен забезпечувати та гарантувати необхідний ступінь надійності від досягнення граничних станів на всіх стадіях: виготовлення, транспортування, зведення

та експлуатації.

Під час проектування та розрахунків проєктувальник приймає ідеалізовану розрахункову модель конструкції або споруди та в розрахунках використовує цілий ряд різноманітних гіпотез та допущень.

Розрахунок залізобетонних і бетонних конструкцій ґрунтується на розрахункових ситуаціях, що визначаються розрахунковою схемою (або моделлю) конструкції та сукупністю відповідних навантажень, впливів, включно з впливом навколишнього середовища. Дуже важливо, щоб розрахункова модель і базові передумови розрахунку відображали реальні умови роботи конструкцій, враховуючи їхнє положення в загальній системі споруди, фізичну та геометричну нелінійність, характер утворення тріщин тощо, що відповідає обраному граничному стану.

Викладені вище відомості носять теоретичний характер і повинні відповідати дійсним умовам, що виникають безпосередньо на будівельному майданчику. В свою чергу виконання робіт на будівельному майданчику не повинно суперечити вимогам проєкту, вимогам нормативних документів, технічних регламентів, технологічних карт та здоровому глузду. Але, на жаль, деякі процеси при виконанні робіт при проведенні бетонування монолітних конструкцій дуже суперечливі і ставлять під сумнів прийняті в розрахунках принципи моделювання будівлі або споруди. І, як показує практика, іноді порушення цих принципів і процесів призводить до аварій.

Одним з таких важливих процесів є послідовне бетонування конструкцій в процесі зведення будівлі. У розрахунках монолітний залізобетон розглядається як суцільне середовище, яке не має дефектів у вигляді тріщин, швів тощо. Але фактично, зведення будівлі виконується поступово, і як наслідок, при бетонуванні будівлі на стиках конструкцій виникають так звані «холодні шви» – зони, де автоматично, за потреби технологічного процесу виконуються перерви бетонування. Це, як правило, верхня або нижня площа перекриття.

Одним із таких важливих процесів є послідовне бетонування конструкцій у процесі зведення будівлі. В розрахунках монолітний залізобетон розглядається як суцільне середовище, яке не має дефектів у вигляді тріщин, швів тощо. Але фактично, зведення будівлі виконується поступово, і як наслідок, при бетонуванні будівлі на стиках конструкцій виникають так звані «холодні шви» – зони, де автоматично, за потреби технологічного процесу, виконуються перерви бетонування. Це, як правило, верхня або нижня площа перекриття.

Після укладання бетонної суміші, її ущільнення та затвердіння у верхній площині конструкції виникає тонкий шар цементної плівки, який не відповідає технічним характеристикам бетону і повинен бути видалений перед укладання бетонної суміші наступного шару. Ця дія нормована і викладена в ДСТУ-Н Б В.2.6-203-2015 «Настанова з виконання робіт при виготовленні будівельних конструкцій» [2].

В чинних українських нормах ДБН В.2.6-98:2009 [1] замість терміну «холодний шов» найчастіше використовують термін «робочий шов».

Рекомендації щодо укладання бетонних сумішей передбачають (пункт 5.3 [2]):

«5.3.1 Перед бетонуванням скельні основи, горизонтальні і похилі бетонні поверхні робочих швів мають бути очищені від сміття, забруднення, мастил, снігу і льоду, цементної плівки тощо. Безпосередньо перед укладанням бетонної суміші очищені поверхні мають бути промиті водою і просушені струменем повітря.

5.3.2 Всі конструкції і їх елементи, що закриваються в процесі подальшого виконання робіт (підготовлені основи конструкцій, арматура, закладні вироби тощо), а також правильність встановлення і закріплення опалубки і елементів, що її підтримують, приймаються відповідно до ДБН А.3.1-5 [3]» [2, с. 8].

На жаль, як показує практика, на будівельних майданчиках при виконанні будівельних робіт із зведення будівель та споруд з монолітного залізобетону будівельники та виконавці робіт не завжди виконують дані вимоги.

Результати та обговорення

При огляді конструкцій, підготовлених до бетонування, нерідко можна побачити ситуацію, яка наведена на рис. 1. На одному з об'єктів будівництва був проведений огляд конструкцій, підготовлених до закриття опалубкою та подальшого бетонування. Після огляду було зафіксовано, що на поверхню плити перекриття цементна плівка не була зачищена, крім того, на поверхню плити, в зоні перерізу стін натекло мастило, яким змащували опалубку.



Рис. 1. Підготовлені до закриття опалубки стіни

В іншому випадку інженера з авторського нагляду було викликано для прийняття конструкцій для закриття опалубки, де була зафіксована ситуація, що наведена на рис. 2. Було виявлено, що не тільки цементна

плівка не була зачищена, але ще й не було прибрано будівельне сміття.

Ще як один приклад – було призупинено бетонування колон на одному з об'єктів й розкрита опалубка. Ситуація зі швом бетонування на поверхні плити наведена на рис. 3. На поверхні бетону в зоні перерізу колони залишилися багато залишків після зварювальних робіт, а також не була зачищена цементна плівка.



Рис. 2. Підготовлені до закриття опалубки стіни



Рис. 3. Опалубка колони, розкрита перед бетонуванням

В усіх наведених випадках, після укладання в конструкцію бетонної суміші та її затвердіння, умови суцільності бетону не були дотримані. Отже, проєктні та розрахункові моделі фактично перестають відповідати зведених будівлі.

До чого можуть призвести такі, на перший погляд, «незначні» відхилення від проєктних рішень? Як показала практика, з часом це може призвести до аварії або стати складовою причини, через яку трапилась чи може трапитись аварія.

Як приклад до вищеприданого, можна навести ситуацію, яка трапилась у 2023 році на одній з котелень у місті Одеса: сталася аварія, в результаті якої була зруйнована димова труба (рис. 4).



Рис. 4. Загальний вигляд зруйнованої димової труби

Після огляду зруйнованих частин труби було зафіксовано, що руйнація сталася чітко по швах бетонування. Зруйнована частина труби склалась по блоках, кожен з яких був обмежений цими швами. На рис. 5 наочно видно, що зруйнована частина має чітку горизонтальну площу руйнування. Як показало обстеження, аварія сталась з декількох причин, але однією з них стала відсутність грамотної організації «холодного шва» бетонування.



Рис. 5. Зруйнована частина димової труби

Висновок

Під час дослідження всіх вищезазначених ситуацій на будівництві встановлено, що були порушені правила послідовного бетонування конструкцій. У випадках, представлених на рис.1,2,3, були надані рекомендації щодо усунення недоліків. Отже, як показує практика, при проведенні бетонних робіт треба дуже уважно ставитись до перерв під час бетонування, посилювати контроль за виконанням робіт і ретельно доводити як до інженерного складу на будівельному майданчику, так і до виконавців робіт, важливість підготовки поверхонь при подальшому бетонуванні.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. DBN V.2.6-98:2009 Betonni ta zalizobetonni konstruksii. Osnovni polozhennia. – K.: Minrehion Ukrainy, 2011. – 71 s.
2. DSTU-N B V.2.6-203-2015 Nastanova z vykonannia robot pry vyhotovleni budivelnikh konstruksii. – K.: Minrehion Ukrainy, 2015. – 56 s.
3. DBN A.3.1-5:2016 «Orhanizatsiia budivelnogo vyrobnytstva». – K.: Ministerstvo rehionalnogo rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunalnogo hospodarstva Ukrainy, 2016. – 46 s.

Література

1. ДБН В.2.6-98:2009 Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. – К.: Мінрегіон України, 2011. – 71 с.
2. ДСТУ-Н Б В.2.6-203-2015 Настанова з виконання робіт при виготовленні будівельних конструкцій. – К.: Мінрегіон України, 2015. – 56 с.
3. ДБН А.3.1-5:2016 «Організація будівельного виробництва». – К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2016. – 46 с.

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 06.05.2025	Received 06.05.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 25.05.2025	Received in revised form 25.05.2025
Прийнято 04.06.2025	Accepted 04.06.2025
Опубліковано 25.06.2025	Published 25.06.2025

O. V. Bondarenko

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9056-2802>
Department of Reinforced Concrete Structures and Transport Facilities
Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Didrichson St., 4, Odesa, Ukraine, 65029

O. F. Maistrenko*

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2941-4149>
Department of Reinforced Concrete Structures and Transport Facilities
Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Didrichson St., 4, Odesa, Ukraine, 65029

T. I. Marchenko

Consulting Engineer, LTD «TEKHNAHLIADBUD», Didrichson St., 27, office 1, Odesa, Ukraine, 65029

O. M. Ivanova

Chief Engineer, CC «BUDOVA», Osypova St., 25, Odesa, Ukraine, 65012

*corresponding author, e-mail: maystrenkoof@gmail.com

Problems of operational reliability of monolithic buildings and structures in case of non-compliance with the requirements of sequential concreting

How to Cite:

Bondarenko, O. V., Maistrenko, O. F., Marchenko, T. I., Ivanova, O. M. (2025). Problems of operational reliability of monolithic buildings and structures in case of non-compliance with the requirements of sequential concreting. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 23, 57-65. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-06](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-06)

Abstract. Operational and structural reliability is the most important criterion for the life cycle of monolithic buildings and structures.

One of the most important processes in the construction of a building is the sequential concreting of structures. In fact, the construction of a building is carried out gradually; therefore, at the joints of structures, there are zones where, during the technological process, breaks in concreting are performed, which leads to the appearance of a thin layer of cement film, which does not meet the technical characteristics of concrete and must be removed before laying the concrete mixture of the next layer. Unfortunately, as practice shows, builders do not always comply with these requirements, which can lead to accidents.

The article presents real cases of such situations in construction.

At one of the construction sites, an inspection was conducted of the structures prepared for closing the formwork and subsequent concreting. It was noted that the previous cement surface of the floor slab was not cleaned properly, and grease, which is used to lubricate the formwork, had leaked onto the surface of the slab. In another case, the technical engineer recorded a situation where the previous cement surface was not cleaned off the objects, and construction dirt and spots remained. For another example, the concreting of columns at one of the sites was suspended, and the formwork was opened. Many welding residues were found on the concrete surface in the column area and other defects. In all other cases, after placing the concrete mix in the structure and its hardening, we cannot speak about the integrity of the concrete. Therefore, design and calculation models do not work.

What are the consequences of such deviations from the design? As practice has shown, over time, this can lead to an accident or become part of the reason why an accident occurred. As an example, we can consider the situation that happened in the year 2023 at one of the boiler houses in the city of Odessa. After examining the destroyed parts and the corresponding reports, it was noted that the destruction occurred clearly along the concreting seams. The destroyed part of the chimney was divided into blocks, each of which is limited by these seams. As the examination showed, the accident occurred for several reasons, but one of them was the lack of a competent organization of the concreting seam.

Therefore, when carrying out concrete work, it is important to ensure that there are no interruptions during concrete pouring and to ensure that the control over the breakdown of the work is carefully explained to engineers and workers, as well as the importance of surface preparation during concrete pouring.

Keywords: reinforced concrete structures, operational reliability, emergency condition, concreting seam, formwork.

УДК 539.3

О.Г. Бондарський*

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4624-8485>

Кафедра прикладної математики та механіки

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

О.А. Ужегова

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2352-2907>

Кафедра будівництва та цивільної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

С.Я. Дробишинець

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9060-7716>

Кафедра будівництва та цивільної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

В.Є. Денейчук

Аспірант

Кафедра прикладної математики та механіки

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

В.І. Формазюк

Студент

Кафедра будівництва та цивільної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

*автор-кореспондент, e-mail: bondarskij22@ukr.net

Моделювання та розрахунок тришарової складеної оболонки типу “конус-циліндр-конус”

Цитувати як:

Бондарський О.Г., Ужегова О.А., Дробишинець С.Я., Денейчук В.Є., Формазюк В.І. (2025). Моделювання та розрахунок складеної оболонки типу “конус-циліндр-конус”. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 23, 66-74. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-07](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-07)

© 2025, Бондарський О.Г., Ужегова О.А., Дробишинець С.Я., Денейчук В.Є., Формазюк В.І.

Анотація. У статті наведено результати розрахунку багатошарової конструкції типу “конус-циліндр-конус”, яка знаходиться під дією силового та температурного навантаження. Багатошарові конструкції та системи із них широко застосовуються в різних галузях, де потрібне поєднання кількох властивостей – наприклад, міцності, теплоізоляції, звукоізоляції, стійкості до вологи, вогню тощо. Основними сферами їх використання є будівництво, промисловість, автомобілебудування та авіація, військова та космічна техніка. Розрахунок багатошарових конструкцій має ряд особливостей, що відрізняє його від одношарових систем, оскільки потрібно враховувати взаємодію шарів, їхні фізико-механічні властивості та фундаментальне призначення. Такий розрахунок вимагає урахування анізотропії, міжшарової взаємодії, теплових та механічних навантажень. Для цього створюються складні моделі які дають можливість точніше прогнозувати поведінку та довговічність конструкції. Існує кілька

теоретичних підходів до розрахунку багатошарових конструкцій, і вибір теорії залежить від типу конструкції, її товщини, типу навантаження, а також від необхідної точності.

В основу дослідження покладений варіант кінцево-зсувної теорії розрахунку багатошарових пластин та оболонок з урахуванням температури в гіпотезах для поперечних дотичних напружень. На першому етапі дослідження розв'язувалася задача стаціонарної теплопровідності багатошарової оболонки в якій застосована гіпотеза щодо розподілу температури по товщині багатошарового пакету. На основі отриманих характеристик температурного поля, розв'язувалася задача термопружної рівноваги складеної оболонки. Отримані крайові задачі теплопровідності і термопружної рівноваги реалізувалися методом дискретної ортогоналізації.

Як впливає із побудованих графіків, прогини і напруження, які виникають при дії температурного поля, в 4-20 разів перевищують аналогічні величини, які отримані при силовому навантаженні. Це свідчить про те, що визначальним фактором напружено-деформованого стану складеної оболонки є температурний вплив.

Ключові слова: багатошарові конструкції, складені оболонки, кінцево-зсувна теорія багатошарових пластин та оболонок

Вступ

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Багатошарові конструкції та системи із них широко застосовуються в різних галузях, де потрібне поєднання кількох властивостей – наприклад, міцності, теплоізоляції, звукоізоляції, стійкості до вологи, вогню тощо. Основними сферами їх використання є будівництво, промисловість, автомобілебудування та авіація, військова та космічна техніка [1,2].

Розрахунок багатошарових конструкцій має ряд особливостей, що відрізняє його від одношарових систем, оскільки потрібно враховувати взаємодію шарів, їхні фізико-механічні властивості та фундаментальне призначення [3,4].

Такий розрахунок вимагає урахування анізотропії, міжшарової взаємодії, теплових та механічних навантажень. Для цього створюються складні моделі які дають можливість точніше прогнозувати поведінку та довговічність конструкції [5,6].

Існує кілька теоретичних підходів до розрахунку багатошарових конструкцій, і вибір теорії залежить від типу конструкції (плита, оболонка, балка, пластина), її товщини, типу навантаження (механічне, теплове тощо), а також від необхідної точності [7,8].

Класична теорія пластин і оболонок, яка заснована на припущенні, що нормалі до середньої поверхні залишаються прямими і перпендикулярними після деформації, має суттєве обмеження.

Вона працює добре лише для тонких одношарових конструкцій і може бути застосована для розрахунку тонких пластин та простих одношарових оболонок.

Тому для багатошарових конструкцій необхідно застосовувати уточнені теорії з урахуванням поперечного зсуву, міжшарових взаємодій, неоднорідності матеріалу по товщині та умов контакту між шарами [9,10].

Мета і завдання дослідження. Метою та завданням дослідження є розрахунок складеної конструкції типу “конус-циліндр-конус” на силові та теплові навантаження. Така геометрична форма оболонки часто використовується там, де потрібна аеродинамічна обтічність, міцність або ефективне використання простору. Це аерокосмічна техніка, авіація, суднобудування, наземні системи і також наукове обладнання. Перевагами такої форми оболонки є її гарна обтічність, оптимальний розподіл напружень і простота виготовлення.

Матеріали та методи

В основу дослідження покладений варіант кінцево-зсувної теорії розрахунку багатошарових пластин та оболонок з урахуванням температури в гіпотезах для поперечних дотичних напружень. На першому етапі дослідження розв’язувалася задача стаціонарної теплопровідності багатошарової оболонки в якій застосована гіпотеза щодо розподілу температури по товщині багатошарового пакету. На основі отриманих характеристик температурного поля розв’язувалася задача термопружної рівноваги складеної оболонки. Отримані крайові задачі теплопровідності і термопружної рівноваги реалізувалися методом дискретної ортогоналізації [5,6].

Результати та обговорення

Об’єктом розрахунку є конструкція мобільної споруди, яка являє собою тришарову складену оболонку типу “конус-циліндр-конус” (Рис.1).

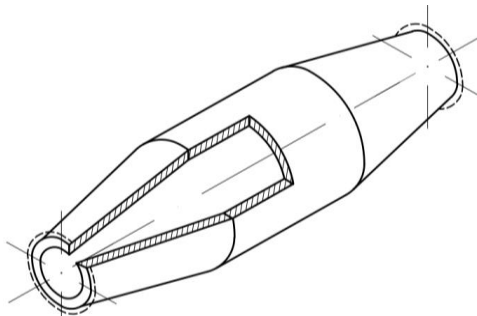


Рис. 1. Схема складеної оболонки

Такого типу мобільні споруди використовуються у сферах, де така форма обґрунтована аеродинамічними, технологічними або логістичними міркуваннями. Така геометрія зустрічається в мобільних аерокосмічних установках, аеродинамічних стендах, в мобільних капсулах. Часто такі конструкції підлягають впливу нерівномірного температурного поля.

Геометричні розміри і будова оболонки по товщині показані на рис.2.

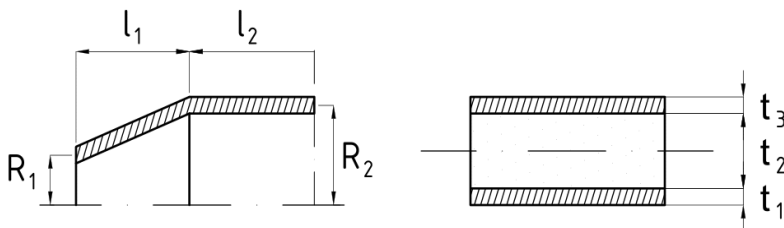


Рис. 2. Будова та геометричні розміри оболонки

Оболонка має наступні геометричні характеристики: довжина конічних частин $l_1 = l_3 = 1,5$ м; довжина циліндричної частини $l_2 = 3$ м; менший радіус конуса $R_1 = 1,4$ м, радіус циліндра $R_2 = 1,6$ м; товщина несучих шарів $t_1 = t_3 = t_n = 0,002$ м, заповнювача - $t_2 = t_{\text{зап}} = 0,08$ м. Несучі шари виконані з алюмінієвого сплаву з характеристиками: модуль пружності $E_n = 0,7 \cdot 10^5$ МПа, модуль зсуву $G_n = 0,27 \cdot 10^5$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\nu_n = 0,3$, коефіцієнт теплопровідності $\lambda = 163$ Вт/(м·К); коефіцієнт лінійного теплового розширення $\alpha_n = 23 \cdot 10^{-6}$ 1/К. В якості заповнювача був використаний пінопласт: $E_{\text{зап}} = 200$ МПа, $G_{\text{зап}} = 77$ МПа, $\nu_{\text{зап}} = 0,3$, $\lambda = 0,058$ Вт/(м·К), $\alpha_{\text{зап}} = 0$. Оболонка перебуває під впливом температурного поля і рівномірно розподіленого по всій поверхні навантаження інтенсивністю $q = 0,01$ МПа.

На рис. 3 показаний розподіл температури відповідно на зовнішній і внутрішній поверхнях оболонки, а також рівномірно розподілене навантаження.

З урахуванням симетрії задача розв'язувалася для інтервалу $0 \leq x \leq L/2$ при умові симетрії в точці $x_1 = L/2$. На рис. 4,5 представлені епюри радіальних переміщень U_z , меридіональних напружень σ_{11}^+ і окружних σ_{22}^+ , які побудовані для двох меридіональних січень оболонки (на рис. 3 точки А і Б).

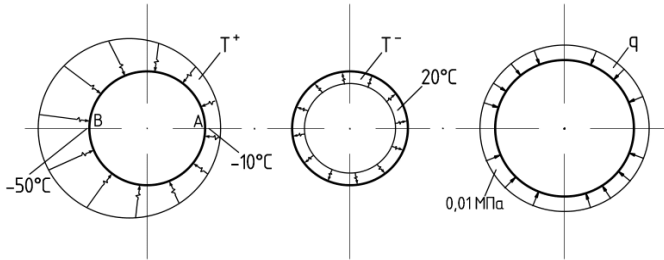


Рис. 3. Розподіл температури та навантаження на поверхнях оболонки

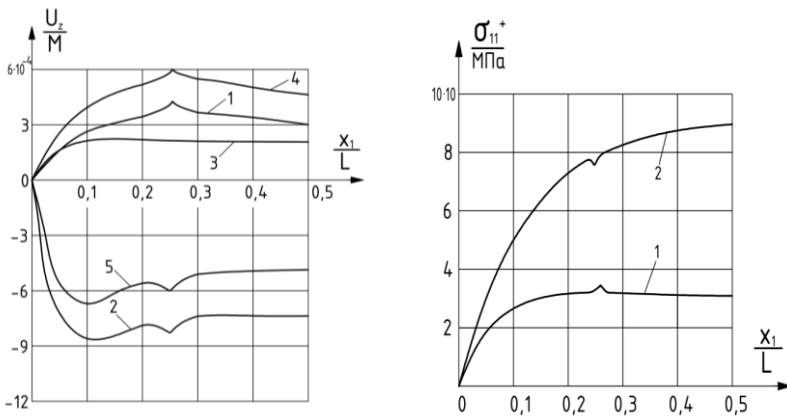


Рис. 4. Епюри переміщень U_z та меридіональних напружень σ_{11}^+

На рисунках 4,5 цифрами 1 і 2 позначені епюри характеристик напружено-деформованого стану, які побудовані відповідно для січень А і Б при температурному навантаженні; цифрою 3 - епюри при силовому навантаженні; цифрою 4 - при одночасній дії температури і силового навантаження для січення А, цифрою 5 - те ж саме навантаження для січення Б.

Аналіз отриманих результатів показує, що переміщення U_z (рис. 4) для 1, 3, 4 випадків зовнішнього навантаження мають додатні значення, а для випадків 2 і 5 - від'ємні значення. При цьому абсолютні максимальні значення U_z досягаються при температурному впливі у січнні Б. Найбільші значення меридіональних напружень σ_{11}^+ мають місце для температурного навантаження у січнні Б (рис. 4). Окружні напруження σ_{22}^+ (рис. 5) при всіх сполученнях навантажень є додатними і досягають максимуму в січнні Б для навантаження виду 5.

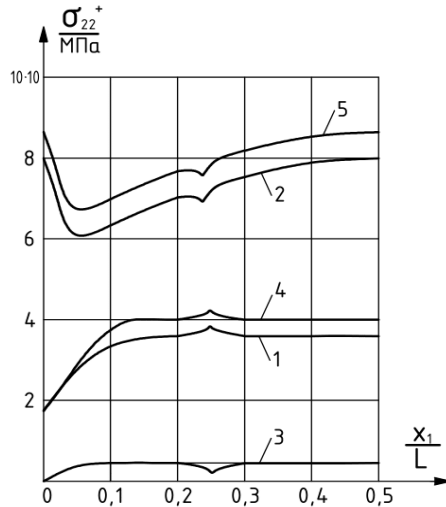


Рис. 5. Епюри окружних напружень σ_{22}^+

Висновки

Як випливає із графіків, прогини і напруження, які виникають при дії температурного поля в 4-20 разів перевищують аналогічні величини, які отримані при силовому навантаженні. Це свідчить про те, що визначальним фактором напружено-деформованого стану складеної оболонки є температурний вплив.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. Grigorenko Ya.M., Vasylenko A.T., Pankratova N.D. Statics of anisotropic thin-walled shells. Kyiv: Higher School. 1985. – 189 p.
2. Rasskazov O.O., Sokolovska I.I., Shulga M.A. Theory and calculation of layered orthotropic plates and shells. Kyiv: Higher School. 1986. – 191 p.
3. Grigorenko Ya.M., Vasylenko A.T., Pankratova N.D. To the solution of the stress state of thick-walled inhomogeneous shells. – Applied Mechanics, 1974, Vol 10, No.5, pp. 86-93
4. Pasichnyk R., Pasichnyk O., Uzhegova O., Andriichuk O., Bondarskii O. Calculation Optimization of Complex Shape Shells by Numerical Method. In: Ivanov V. et al. Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. pp. 643-652. DOI:10.1007/978-3-030-22365-6_64. Online ISBN 978-3-030-22365-6.
5. Pankratova N.D., Rasskazov A.O., Bondar A.G., Bondarskii A.G. Thermostress state of shear-pliable multilayer orthotropic shells and plates Soviet Applied Mechanics, 1987, 23(7), pp. 658–663
6. Bondar A.G., Rasskazov A.O., Kozlov V.I., Bondarskii A.G. Thermoelastic equilibrium of multilayered composite shells. Strength of Materials. This link is disabled., 1989, 21(6), pp. 784–789.
7. Bondarsky O.G., Babkov O.V. Influence of thermal sensitivity of layer material on the stress-strain state of multilayer shells and plates // Modern technologies and calculation methods in construction: Collection of scientific works – Lutsk: Lutsk National Technical University, 2021. – Issue 16. – P. 20-25.
8. Bondarsky O.G., Babkov O.V., Kosenko V.I. Methodology for numerical solution of boundary value problems of statics of multilayer structure systems. // Interuniversity collection "Scientific notes". – Issue №33. – 2011. – P. 50–52.
9. Bondarsky O.G., Uzhegova O.A. Modeling and research of thermoelastic state of three-layer composite shell // Modern technologies and calculation methods in construction: Collection of scientific works – Lutsk: Lutsk National Technical University, 2022. – Issue 18. – P. 34-39. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-8\(18\)-04](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-8(18)-04)
10. Trach V.M., Podvorni A.V., Zhukova N.B., Bondarskyi O.G. Free vibrations of layered anisotropic thick-walled cylindrical shells // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles. – Kyiv: KNUBA, 2024. – Issue 113. – P. 250-264. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2024.113.250-264>

Література

1. Григоренко Я.М., Василенко А.Т., Панкратова Н.Д. Статика анізотропних тонкостінних оболонок. Київ: Вища школа. 1985. – 189 с.
2. Рассказов О.О., Соколовська І.І., Шульга М.А. Теорія і розрахунок шаруватих ортотропних пластин і оболонок. Київ: Вища школа. 1986. – 191 с.
3. Григоренко Я.М., Василенко А.Т., Панкратова Н.Д. До розв'язку напруженого стану товстостінних неоднорідних оболонок. – Прикладна механіка, 1974, Т.10, №5, С. 86-93
4. Pasichnyk R., Pasichnyk O., Uzhegova O., Andriichuk O., Bondarskii O. Calculation Optimization of Complex Shape Shells by Numerical Method. In: Ivanov V. et al. Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. Pp 643-652. DOI:10.1007/978-3-030-22365-6_64. Online ISBN 978-3-030-22365-6.

5. Pankratova N.D., Rasskazov A.O., Bondar A.G., Bondarskii A.G. Thermostress state of shear-pliable multilayer orthotropic shells and plates Soviet Applied Mechanics, 1987, 23(7), pp. 658–663

6. Bondar A.G., Rasskazov A.O., Kozlov V.I., Bondarskii A.G. Thermoelastic equilibrium of multilayered composite shells. Strength of Materials. This link is disabled., 1989, 21(6), pp. 784–789

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

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

9. Бондарський О.Г., Ужегова О.А. Моделювання та дослідження термопружного стану тришарової складеної оболонки // Сучасні технології та методи розрахунків в будівництві: Зб. наук. праць – Луцьк: Луцький НТУ, 2022. – Вип. 18. – С. 34-39. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-8\(18\)-04](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-8(18)-04)

10. Trach V.M., Podvornyi A.V., Zhukova N.B., Bondarskyi O.G. Free vibrations of layered anisotropic thick-walled cylindrical shells // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles. – Kyiv: KNUBA, 2024. – Issue 113. – P. 250-264. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2024.113.250-264>

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 19.05.2025	Received 19.05.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 25.05.2025	Received in revised form 25.05.2025
Прийнято 01.06.2025	Accepted 01.06.2025
Опубліковано 25.06.2025	Published 25.06.2025

O.G. Bondarskyi*

Ph.D., Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4624-8485>
Department of Applied Mathematics and Mechanics
Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

O.A. Uzhegova

Ph.D., Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2352-2907>
Department of Construction and Civil Engineering
Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

S.Y. Drobyshynets

Ph.D., Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9060-7716>
Department of Construction and Civil Engineering
Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

V.E. Deneychuk

Postgraduate student
Department of Applied Mathematics and Mechanics
Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

V.I. Formazyuk

Student
Department of Industrial and Civil Engineering
Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

*corresponding author, e-mail: bondarskij22@ukr.net

Modeling and calculation of a three-layer composite shell of the “cone-cylinder-cone” type

Cite as:

Bondarskyi O.G., Uzhegova O.A., Drobyshynets S.Y., Deneychuk V.E., Formazyuk V.I. (2025). Modeling and calculation of a composite shell of the “cone-cylinder-cone” type. Modern technologies and calculation methods in construction, 23, 66-74. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-07](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-07)

Abstract. The article presents the results of calculating a multilayer structure of the “cone-cylinder-cone” type under the action of force and temperature loads. Multilayer structures and systems made of them are widely used in various industries where a combination of several properties is required – for example, strength, thermal insulation, sound insulation, resistance to moisture, fire, etc. The main areas of their use are construction, industry, automotive and aviation, military, and space technology. The calculation of multilayer structures has several features that distinguish it from single-layer systems, since it is necessary to take into account the interaction of layers, their physical and mechanical properties, and fundamental purpose. Such a calculation requires taking into account anisotropy, interlayer interaction, thermal, and mechanical loads. For this purpose, complex models are created that make it possible to more accurately predict the behavior and durability of the structure. There are several theoretical approaches to the calculation of multilayer structures, and the choice of theory depends on the type of structure, its thickness, type of load, as well as the required accuracy.

The research is based on a variant of the finite-shear theory of calculation of multilayer plates and shells, taking into account temperature in hypotheses for transverse tangential stresses. At the first stage of the research, the problem of stationary thermal conductivity of a multilayer shell was solved, in which the hypothesis of temperature distribution over the thickness of the multilayer package was applied. Based on the obtained characteristics of the temperature field, the problem of thermoelastic equilibrium of a composite shell was solved. The obtained boundary value problems of thermal conductivity and thermoelastic equilibrium were implemented by the method of discrete orthogonalization.

As follows from the constructed graphs, the deflections and stresses that arise under the action of a temperature field are 4-20 times higher than the similar values obtained under force loading. This indicates that the temperature effect is the determining factor of the stress-strain state of a composite shell.

Keywords: multilayer structures, composite shells, finite-shear theory of multilayer plates and shells.

УДК 624.9

А. С. Величкович

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2685-8753>

Кафедра будівництва

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15,
Івано-Франківськ, Україна, 76019

А. В. Андрусяк*

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2099-9045>

Кафедра будівництва

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15,
Івано-Франківськ, Україна, 76019

О. В. Козак

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0025-6554>

Кафедра будівництва

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15,
Івано-Франківськ, Україна, 76019

І. І. Палійчук

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8443-2702>

Кафедра будівництва

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15,
Івано-Франківськ, Україна, 76019

В. В. Кулай

студент групи Б-21-2, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5744-8039>

Кафедра будівництва

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15,
Івано-Франківськ, Україна, 76019

*автор-кореспондент, e-mail: andriiandrusiak@gmail.com

Числове моделювання несучого профнастилу із застосуванням еквівалентної ортотропної пластини

Цитувати як:

Величкович А. С., Андрусяк А. В., Козак О. В., Палійчук І. І., Кулай В. В. (2025). Числове моделювання несучого профнастилу із застосуванням еквівалентної ортотропної пластини. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 23, 75-88. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-08](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-08)

© 2025, Величкович А. С., Андрусяк А. В., Козак О. В., Палійчук І. І., Кулай В. В.

Анотація. Профільовані сталеві листи, завдяки своїй високій ефективності за критеріями “вага – жорсткість” і “вага – міцність”, широко використовуються у сучасному будівництві як несучі елементи покрівель, міжповерхових перекриттів і сендвіч-панелей. Особливості їх конструкції зумовлюють яскраво виражену ортотропну поведінку, що потребує спеціальних підходів до числового моделювання. У той час як традиційні об’ємні скінченно-елементні моделі забезпечують високу точність, вони є надмірно ресурсоємними для практичного проектування в програмних середовищах ЛІРА-САПР та SCAD

Office. Це спричиняє актуальну потребу у спрощених, але водночас достатньо точних еквівалентних моделях. У даній роботі запропоновано числово-аналітичну методику заміни профнастилу еквівалентною ортотропною пластиною, яка відтворює основні характеристики згинальної жорсткості профільованого листа в головних напрямках. Віртуальні експерименти в середовищі ЛІРА-САПР дозволили отримати максимальні прогини профнастилу при навантаженні вздовж та уперек ребер жорсткості, що слугувало базою для розрахунку еквівалентних модулів пружності, коефіцієнтів Пуассона, модуля зсуву та товщини пластини. Верифікація отриманих результатів підтверджує здатність ортотропної моделі адекватно відтворювати не лише деформаційну поведінку, а й дозволяє проводити оцінку міцності профнастилу при типовому навантаженні. Розроблений підхід дозволяє інженерам використовувати у проєктних розрахунках простіші моделі пластин без втрати точності, що цінно в задачах із великою кількістю елементів. Корисність запропонованої моделі буде особливо відчутною при моделюванні великих площ дахових покриттів та при оптимізаційному проєктуванні, де критичними є швидкість і обчислювальні ресурси. Побудована модель дозволяє ефективно оцінювати допустимі навантаження на профнастил за критеріями граничного прогину та міцності з урахуванням варіантів обтирання та довжини прогонів.

Ключові слова: металеві конструкції, профіль, жорсткість, профнастил, числова модель, ортотропна пластина

Вступ

Протягом останніх десятиліть профільовані тонкостінні елементи посіли важливе місце у сучасному будівництві завдяки своїй винятковій ефективності за критеріями "вага – жорсткість" і "вага – міцність". Їхня конструктивна перевага полягає у високій згинальній жорсткості в напрямку, перпендикулярному до ребер жорсткості, та підвищеній податливості при згині вздовж ребер, що поєднує потрібну несучу здатність із здатністю адаптуватися до локальних деформацій. Така особливість поведінки наближає профільовані елементи до ортотропних середовищ із спрямованою анізотропією. Завдяки цим властивостям профільовані структури широко використовуються в інженерії – від пакувальних матеріалів до аерокосмічних систем [1–3].

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. У будівництві несучий профільований лист є стандартним елементом дахових і міжповерхових покриттів, здатним ефективно сприймати снігові, вітрові та інші експлуатаційні навантаження [4, 5]. За функціональним призначенням профнастил поділяють на стіновий, покрівельний та несучий. У цьому дослідженні розглядається саме несучий тип, до якого зазвичай відносять листи з висотою профілювання понад 35 мм. Окрім застосування в огорожувальних та покрівельних конструкціях, несучий профнастил використовують як незнімну опалубку в монолітних перекриттях [6], у конструкціях сендвіч-панелей [7], настилах промислових підлог [8], міжповерхових перекриттях, легких тонкостінних оболонках тощо [9]. У

кожному з цих випадків актуальною є потреба в точному та зручному числовому моделюванні його роботи під навантаженням.

У механіці деформівного тіла для опису поведінки конструкцій із періодичною геометрією, таких як профільовані листи, широко застосовуються методи гомогенізації. Вони ґрунтуються на заміні складної циклічної структури еквівалентною ортотропною моделлю з усередненими жорсткісними характеристиками [10]. За умови, що крок профілю суттєво менший за розміри конструкції, еквівалентні модулі пружності, коефіцієнти Пуассона та жорсткості згину можуть бути визначені аналітично або чисельно [11]. Зростаючий інтерес також викликає моделювання тонкостінних систем із включеннями та недосконаlostями, де вже сформовано низку числово-аналітичних підходів до оцінки жорсткісних і міцнісних характеристик таких структур [12–15].

Аналіз поведінки профільованого листа в програмних комплексах типу ЛІРА-САПР чи SCAD Office стикається зі складністю через його геометричні особливості, що потребує побудови надзвичайно деталізованих об'ємних моделей. Створення подібних моделей вимагає додаткових витрат часу, а їх аналіз – великих обчислювальних ресурсів, що суттєво обмежує їхню придатність для практичних інженерних розрахунків, особливо на великих площах дахових покриттів або в задачах оптимізаційного проектування [16, 17]. Тому доцільним є використання спрощеної ортотропної моделі, що еквівалентна профнастилу за згинальною жорсткістю та забезпечує подібну деформаційну поведінку. Такий підхід дозволяє використати стандартні можливості згаданих програмних комплексів для ортотропних пластин, спростити числове моделювання, зберігаючи при цьому необхідну точність результатів.

Відомо, що подібні ідеї вже знаходили відображення в аналітичних дослідженнях [18], однак більшість із них мають обмежену прикладну реалізацію і не узгоджуються зі специфікою застосування у будівельних програмних середовищах. Часто в них також нехтують напрямною анізотропією згинальної жорсткості, яка є визначальною для оцінки деформативності покриттів під дією експлуатаційних навантажень.

Мета і завдання дослідження. Метою цієї роботи є розробка числово-аналітичної методики моделювання несучих покриттів із профільованого листа у вигляді еквівалентної ортотропної пластини, адаптованої до практичного використання в будівельних програмних комплексах.

Матеріали та методи

Несучий профільований лист має виражену конструктивну ортотропність і під час експлуатації зазвичай працює на згин. Його деформаційна відповідь при згинанні поперек ребер жорсткості суттєво відрізняється від поведінки при згинанні вздовж ребер. Аналогічно, осьове

розтягування профнастилу в напрямках поперек ребер і вздовж ребер викликає істотно різні деформаційні ефекти.

Механічну поведінку сталевого профнастилу апроксимуватимемо ортотропною пластиною з рівнозначними жорсткісними характеристиками. Розглянемо профлист (рис. 1), шарнірно закріплений по двох протилежних сторонах і навантажений рівномірно розподіленим навантаженням p . Йому поставимо у відповідність ортотропну пластину з аналогічною схемою закріплення і навантаження (рис. 2). Довжина L_y і ширина L_x пластини та профлиста вважаються однаковими. Механічні характеристики еквівалентної ортотропної пластини – модулі пружності E_1 і E_2 , коефіцієнти Пуассона ν_{12} і ν_{21} та товщину пластини h_{nl} виберемо такими, щоб вони в середньому відтворювали пружні властивості профлиста. Для цього необхідно провести два віртуальні експерименти і визначити при згині профлиста поперек та вздовж ребер його максимальні прогини: w_n , w_θ .

Константи пружності еквівалентної пластини визначимо з тієї умови, що жорсткості на згин профлиста і еквівалентної пластини повинні бути однаковими.

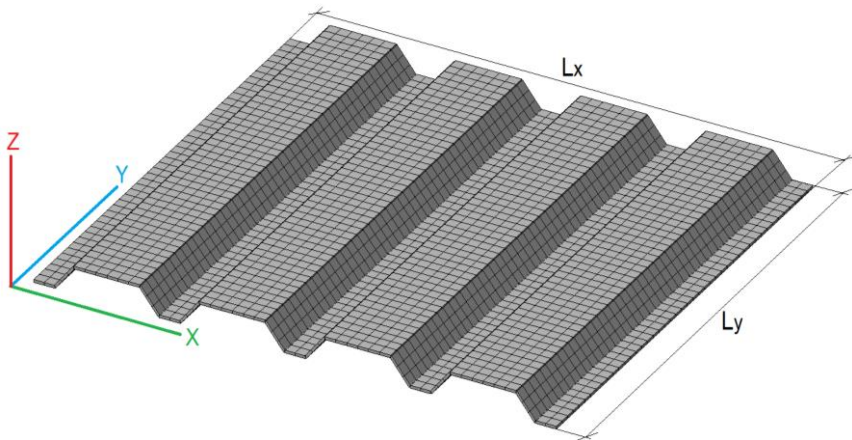


Рис. 1. Фрагмент скінченно-елементної моделі несучого профнастилу

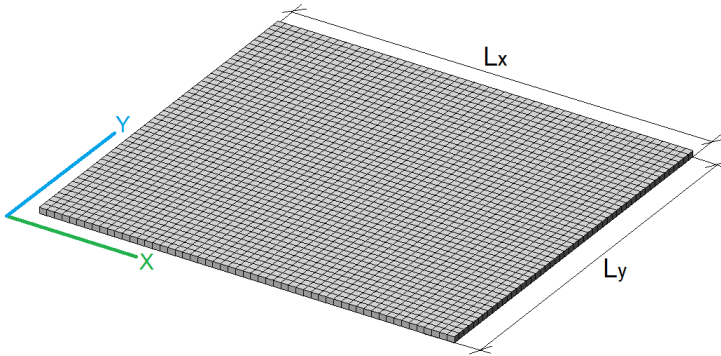


Рис. 2. Фрагмент скінченно-елементної моделі еквівалентної ортотропної пластини

Згідно з теорією ортотропних пластин, згинальні жорсткості в головних напрямках задаються такими формулами (індекси 1 та 2 відповідають осям y та x , рис. 2):

$$D_1 = \frac{E_1 h_{nl}^3}{12(1 - \nu_{12}\nu_{21})} \approx \frac{E_1 h_{nl}^3}{12}; \quad (1)$$

$$D_2 = \frac{E_2 h_{nl}^3}{12(1 - \nu_{21}\nu_{12})} \approx \frac{E_2 h_{nl}^3}{12}. \quad (2)$$

Співвідношення між модулями Юнга та коефіцієнтами Пуассона в головних напрямках ортотропії має вигляд

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\nu_{21}}{\nu_{12}} \Rightarrow \nu_{12} = \nu_{21} \frac{E_2}{E_1}, \quad (3)$$

де E_2 та ν_{21} модуль пружності та коефіцієнт Пуассона матеріалу профлиста (їх значення відомі).

Модуль зсуву для ортотропної пластини обчислюється так:

$$G_{12} = \frac{E_1}{2(1 + \nu_{12})}. \quad (4)$$

Згинальні жорсткості реального профнастилу обчислюємо на основі відомих значень максимальних прогинів, отриманих з віртуальних експериментів:

$$D_{1np} = \frac{5p_n L_y^4}{384 w_n}; \quad D_{2np} = \frac{5p_6 L_x^4}{384 w_6}. \quad (5)$$

Отже, алгоритм визначення еквівалентних характеристик ортотропної пластини наступний:

- обчислити згинальні жорсткості профнастилу D_{1np} та D_{2np} за формулами (5), використовуючи результати віртуальних експериментів;
- прирівняти ці значення до відповідних виразів (1) та (2) для ортотропної пластини;
- з отриманої системи рівнянь визначити товщину еквівалентної пластини $h_{nл}$ і невідомий модуль пружності в головному напрямку ортотропії – E_1 ;
- далі, скориставшись формулою (3), визначити невідомий коефіцієнти Пуассона – ν_{21} ;
- обчислити модуль зсуву G_{12} за формулою (4);
- таким чином, отримати повний набір характеристик ортотропної пластини для використання в програмному пакеті: E_1 і E_2 ; ν_{12} і ν_{21} ; G_{12} та $h_{nл}$.

Результати та обговорення

У програмному комплексі ЛПРА-САПР було побудовано скінченно-елементну модель несучого сталевого профнастилу НС-45 із трапецієподібним профілем висотою 45 мм та товщиною металу 1 мм. Для моделювання використано стандартну ширину профлиста $L_x = 1.1\text{ м}$, а довжину $L_y = 1\text{ м}$. Застосовано універсальні прямокутні скінченні елементи оболонки СЕ 41. Такі скінченні елементи призначені для розрахунку на міцність тонких пологих оболонок, плит, балок-стінок тощо. Для забезпечення достовірності результатів була проведена перевірка чутливості до розміру сітки, за результатами якої обрано оптимальний крок дискретизації. У підсумку модель складалася з 13050 скінченних елементів.

Експеримент 1. З метою визначення максимального прогину при згині впоперек ребер жорсткості, профлист було шарнірно закріплено по двох протилежних сторонах і навантажено рівномірно розподіленим (проективним) навантаженням величиною $p_n = 10\text{ кН/м}^2$. Результати числового аналізу (рис. 3) дозволили встановити значення максимального прогину – $w_n = 2.0\text{ мм}$.

Експеримент 2. Для оцінки прогину профлиста при згині вздовж ребер жорсткості, було сформовано альтернативну модель із тими самими геометричними параметрами, але з іншим розташуванням опор. Оскільки в цьому напрямку профлист має значно більшу податливість, величину зовнішнього навантаження було зменшено до $p_e = 100\text{ Н/м}^2$. Проведений імітаційний розрахунок (рис. 4) дозволив визначити максимальний прогин у цьому випадку – $w_e = 48.9\text{ мм}$.

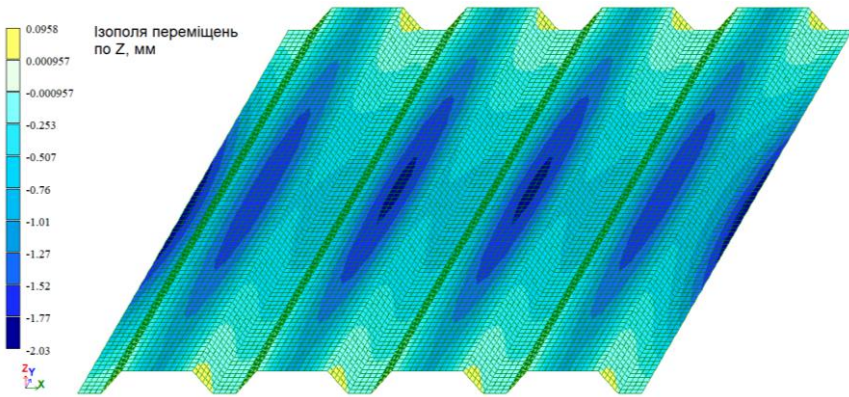


Рис. 4. Згин профнастилу впоперек ребер жорсткості (визначення w_n)

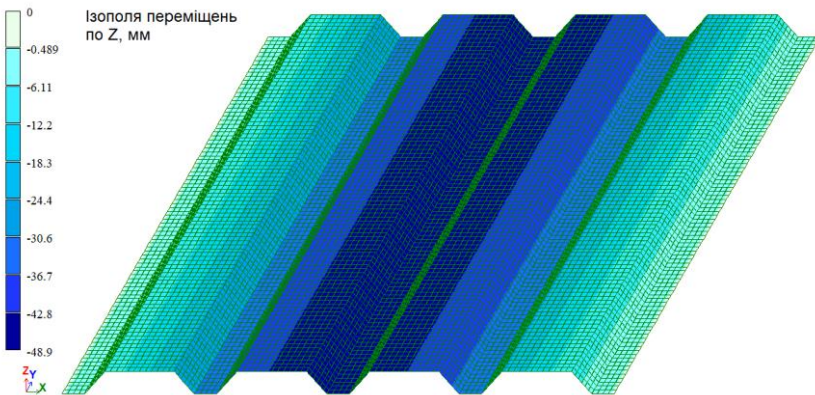


Рис. 5. Згин профнастилу вздовж ребер жорсткості (визначення w_θ)

Виконавши алгоритм дій, описаний у попередньому пункті, та скориставшись формулами (1) – (5), обчислили характеристики еквівалентної ортотропної пластини: $E_1 = 128 \text{ МПа}$ і $E_2 = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$; $\nu_{12} = 0.193 \cdot 10^{-6}$ і $\nu_{21} = 0.3$; $G_{12} = 99.98 \text{ ГПа}$ та $h_{нл} = 15.7 \text{ мм}$. Одержані значення використали для опису механічних характеристик модельної пластини у програмному пакеті.

Оцінимо, як реагує еквівалентна ортотропна пластина на навантаження p_n та p_θ , яким ми піддавали профнастил під час проведення віртуальних експериментів. На рис. 6 еквівалентна ортотропна пластина

працює еквівалентно профнастилу, який згинається уперек ребер жорсткості. На рис. 7 еквівалентна ортотропна пластина працює еквівалентно профнастилу, який згинається вздовж ребер жорсткості.

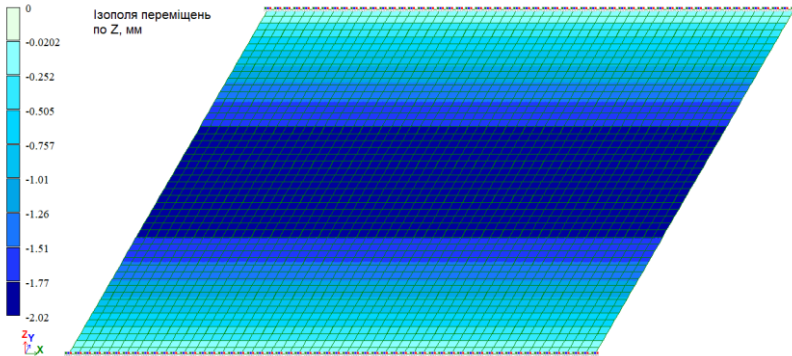


Рис. 6. Ортотропна пластина моделює згин профнастилу поперек ребер жорсткості ($p_n = 10 \text{ KN/m}^2$)

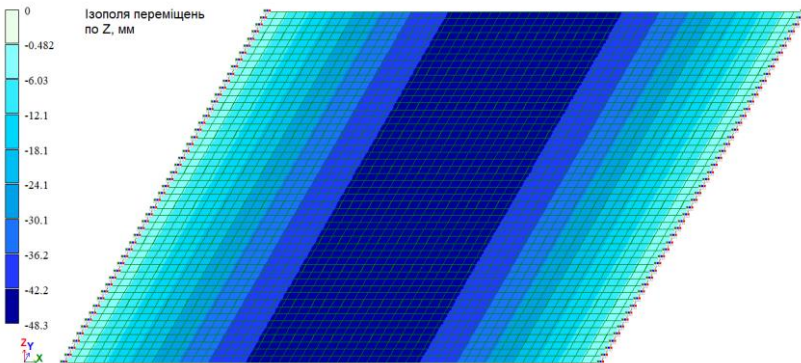


Рис. 7. Ортотропна пластина моделює згин профнастилу вздовж ребер жорсткості ($p_g = 100 \text{ H/m}^2$)

З допомогою модельної пластини ми можемо також здійснити оцінку міцності профнастилу. На рис. 8. подано хромодіаграму еквівалентних напружень, обчислених за критерієм Губера-Мізеса для 3D моделі профнастилу. Аналіз рис. 8 показує, що при згині профлиста впоперек ребер жорсткості проєктивним навантаженням $p_n = 10 \text{ KN/m}^2$, максимальні значення еквівалентних напружень набули значення 53.7 МПа.

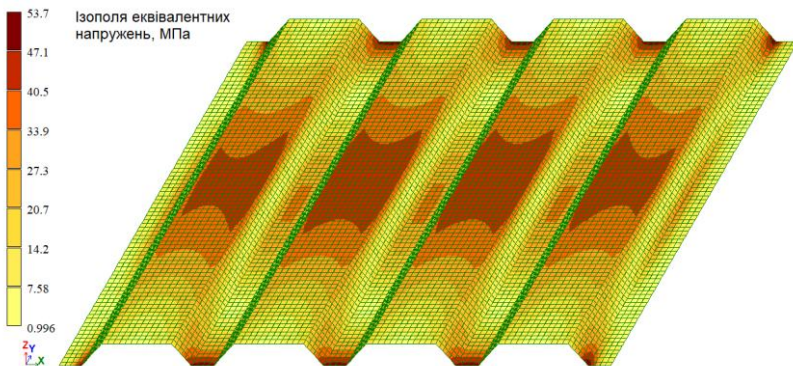


Рис. 8. Еквівалентні напруження в профнастилі, визначені за критерієм Губера-Мізеса

Аналізуючи результати аналогічного згину модельної пластини (рис. 9), можемо визначити максимальний згинальний момент у пластині – $\max M_x = 1.25 \text{ кНм/м}$.

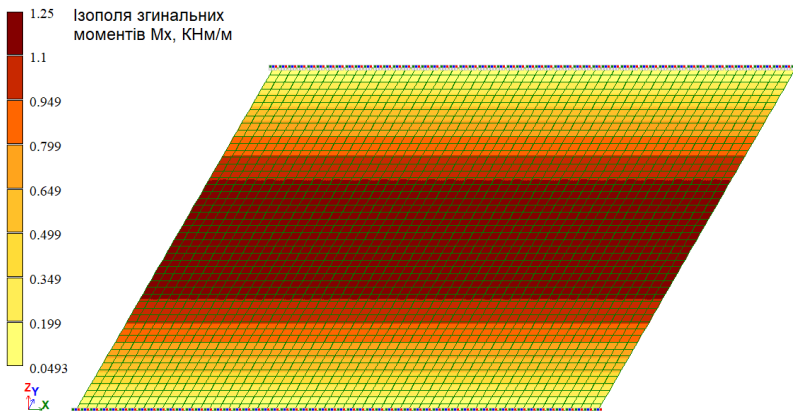


Рис. 9. Згинальні моменти в еквівалентній ортотропній пластині

Для фрагменту листа профнастилу завдовжки 1м визначили значення осьового моменту опору – $W_x = 22.6 \text{ см}^3$. Розділивши максимальний згинальний момент в модельній пластині на осьовий момент опору профнастилу $\max M_x / W_x$, отримаємо значення напруження 55.3 МПа для оцінки міцності. Зауважимо, що цей результат можна уточнити, додатково врахувавши напруження від дії згинального моменту – $\max M_y$. Однак ця

поправка буде відносно невеликою і задля простоти розрахунку нею можна знехтувати.

За допомогою еквівалентної ортотропної пластини визначено орієнтовні значення допустимих навантажень на профнастил (табл. 1). Критеріями для їх визначення обрано граничну несучу здатність за прогином $L_y/150$ та умову міцності профнастилу.

Таблиця 1. Допустимі навантаження на профнастил

Схема обпирання профнастилу	Допустиме навантаження p_n , кН/м ² при величині прогону L_y				
	$L_y=1.5\text{м}$	$L_y=2.0\text{м}$	$L_y=2.5\text{м}$	$L_y=3.0\text{м}$	$L_y=3.5\text{м}$
Однопрогінна	9.80	4.10	2.15	1.20	0.78
Двопрогінна	14.1	7.80	4.92	2.91	1.90

Загалом запропонована методика моделювання несучого профнастилу демонструє поєднання механічного розуміння та прагматизму інженерного моделювання. На відміну від традиційних повнооб'ємних моделей, які потребують надмірних обчислювальних ресурсів, запропонований підхід дозволяє спростити задачу без втрати ключових характеристик деформативності та несучої здатності профільованого листа. Це надає перспективу для використання аналогічних моделей у багатоелементних будівельних системах. Актуальним прикладом можуть слугувати безкаркасні аркові ангари, де несуча здатність огорожувальних оболонок визначає загальну жорсткість системи. У таких конструкціях профільований лист не лише виконує роль огорожувального елемента, а й формує несучий каркас за рахунок геометричної форми. Саме тут еквівалентна ортотропна пластина, яка враховує напрямну анізотропію згинальної жорсткості, може стати корисним інструментом для оцінки стійкості та втрати форми конструкції у глобальному масштабі.

Особливої уваги заслуговує перспектива впровадження у пропонованій моделі нелінійних ефектів – як геометричних (наприклад, великі прогини, або втрата стійкості), так і фізичних (робота матеріалу в пластичній області). Уточнення моделі в цьому напрямку дозволить перейти від умовно-лінійних оцінок до повноцінного конструктивного проєктування. Водночас у прикладному аспекті варто приділити увагу комбінованим конструкціям – наприклад, профнастилу, який використовується як незнімна опалубка в монолітних плитах. У таких задачах еквівалентна модель може бути розвинута до багатоповушарових ортотропних пластин з відповідним урахуванням контактних взаємодій.

Висновки

У дослідженні запропоновано ефективну числово-аналітичну методику моделювання несучого сталевго профнастилу з допомогою

еквівалентної ортотропної пластини, яка відтворює його деформаційну поведінку під дією типових експлуатаційних навантажень. Основою розробленого підходу є визначення еквівалентних модулів пружності, коефіцієнтів Пуассона, модуля зсуву та умовної товщини пластини шляхом аналізу прогинів, отриманих у віртуальних експериментах із повноцінною тривимірною моделлю профнастилу.

Верифікація запропонованої пластинчастої моделі підтвердила її здатність з високою точністю імітувати деформативні характеристики профнастилу в обох головних напрямках ортотропії. Крім того, з допомогою еквівалентної моделі можна проводити розрахунок максимальних еквівалентних напружень для оцінки міцності. Узагальнення результатів дало змогу визначити допустимі навантаження на профнастил залежно від довжини прогонів та схеми обпирання, що робить запропоновану модель корисним інструментом для практичного проектування.

Загалом запропонований підхід зменшує обчислювальні витрати, дозволяючи застосовувати ортотропні моделі у задачах моделювання дахових покриттів, багатопрогінних систем і інших конструкцій з великою кількістю елементів без втрати точності результатів. Отримані результати створюють передумови для подальшого розширення застосування еквівалентних моделей у практиці будівельної механіки та оптимізаційному проектуванні.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

Література

1. Hassan H.Z., Saeed N.M. Advancements and applications of lightweight structures: a comprehensive review. *Discover Civil Engineering*. 2024. Vol. 1. Article 47. <https://doi.org/10.1007/s44290-024-00049-z>
2. Li F.-H., Han B., Zhang A.-H., Liu K., Wang Y., Lu T.-J. A Three-Dimensional Vibration Theory for Ultralight Cellular Sandwich Plates Subjected to Linearly Varying

In-Plane Distributed Loads. *Materials*. 2023. Vol. 16, No. 11. Article 4086. <https://doi.org/10.3390/ma16114086>

3. Yoshino Y., Kimura Y. Strength and Stiffness of Corrugated Plates Subjected to Bending. *Buildings*. 2025. Vol. 15, No. 3. Article 469. <https://doi.org/10.3390/buildings15030469>

4. Li P., Wang S., Zhang M., Huang Z. Supporting Structure of Steel Corrugated Plate-Mold Bag Concrete and Its Application in a Circular Shaft. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, No. 23. Article 12937. <https://doi.org/10.3390/app132312937>

5. Zhao Q., Qiu J., Zhao Y., Yu C. Performance-Based Seismic Design of Corrugated Steel Plate Shear Walls. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2022. Vol. 26. P. 3486–3503. <https://doi.org/10.1007/s12205-022-1188-9>

6. Korcz-Konkol N., Iwicki P. Corrugated Sheeting as a Member of a Shear Panel Under Repeated Load—Experimental Test. *Materials*. 2020. Vol. 13, No. 18. Article 4032. <https://doi.org/10.3390/ma13184032>

7. Peng L., Zhang Z., Wei D., Tang P., Mo G. Nonlinear Analysis of Corrugated Core Sandwich Plates Using the Element-Free Galerkin Method. *Buildings*. 2025. Vol. 15, No. 8. Article 1235. <https://doi.org/10.3390/buildings15081235>

8. John K., Ashraf M., Weiss M., Al-Ameri R. Experimental Investigation of Novel Corrugated Steel Deck under Construction Load for Composite Slim-Flooring. *Buildings*. 2020. Vol. 10, No. 11. Article 208. <https://doi.org/10.3390/buildings10110208>

9. Abramczyk J. Transformed Shell Structures Determined by Regular Networks as a Complex Material for Roofing. *Materials*. 2021. Vol. 14, No. 13. Article 3582. <https://doi.org/10.3390/ma14133582>

10. Aduke R.N., Venter M.P., Coetzee C.J. An Analysis of Numerical Homogenisation Methods Applied on Corrugated Paperboard. *Mathematical and Computational Applications*. 2023. Vol. 28, No. 2. Article 46. <https://doi.org/10.3390/mca28020046>

11. Zhang Y., Wang Y., Li X., Liu H. Equivalent orthotropic model for corrugated plates based on simplified constitutive relation. *Heliyon*. 2022. Vol. 8, No. 11. Article e11264. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11264> .

12. Shatskyi I., Kurtash I. Strength of Plate with the Filled Crack under Multiparameter Loading. *Procedia Structural Integrity*. 2018. Vol. 13. P. 1482–1487. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.12.305>

13. Shats'kyi I.P., Makoviichuk M.V. Contact interaction of crack lips in shallow shells in bending with tension. *Materials Science*. 2005. Vol. 41. P. 486–494. <https://doi.org/10.1007/s11003-006-0006-8>

14. Stress Analysis in Damaged Pipeline with Composite Coating / M. Dutkiewicz et al. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. P. 10676. <https://doi.org/10.3390/app112210676> .

15. Shats'kyi I.P., Makoviichuk M.V. Analysis of the limiting state of cylindrical shells with cracks about the contact of crack lips. *Strength of Materials*. 2009. Vol. 41. P. 560–565. <https://doi.org/10.1007/s11223-009-9166-8>

16. Pal P. Analysis of Corrugated Sheet Using FEM. *Journal of the Institution of Engineers: Series A*. 2021. Vol. 102. P. 33–41. <https://doi.org/10.1007/s40030-020-00502-z>

17. Saurav A.K., Bhola L., Mujumdar P.M., Guruprasad P.J. Equivalent plate model of shape memory polymer composite based variable height corrugated structure. *Mechanics of Advanced Materials and Structures* 2024.Vol. 31, No. 30.P. 13210–13226. <https://doi.org/10.1080/15376494.2024.2334377>

18. Wennberg D., Wennhage P., Stichel S. Orthotropic Models of Corrugated Sheets in Finite Element Analysis. *International Scholarly Research Notices* 2011.Article ID 979532. <https://doi.org/10.5402/2011/979532>

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 24.02.2025	Received 24.02.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 27.04.2025	Received in revised form 27.05.2025
Прийнято 01.06.2025	Accepted 01.06.2025
Опубліковано 25.06.2025	Published 25.06.2025

A. S. Velychkovych

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2685-8753>

Department of Construction

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76019

A. V. Andrusiak*

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2099-9045>

Department of Construction

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76019

O. V. Kozak

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0025-6554>

Department of Construction

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76019

I. I. Paliichuk

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8443-2702>

Department of Construction

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76019

V. V. Kulai

student of group B-21-2, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5744-8039>

Department of Construction

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76019

* corresponding author, e-mail: andriiandrusiak@gmail.com

Numerical modeling of load-bearing corrugated board using. An equivalent orthotropic plate

How to Cite:

Velychkovych A. S., Andrusiak A. V., Kozak O. V., Paliichuk I. I., Kulai V. V., (2025). Numerical modeling of load-bearing corrugated board using an equivalent orthotropic plate. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 23, 85-88. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-08](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-08)

Abstract. Due to their high efficiency in terms of weight-stiffness and weight-strength, profiled steel sheets are widely used in modern construction as load-bearing elements for roofs, floors, and sandwich panels. The peculiarities of their design determine their pronounced orthotropic behavior, which requires special approaches to numerical modeling. While traditional three-dimensional finite element models provide high accuracy, they are excessively resource-intensive for practical design in the LIRA-CAD and SCAD Office software environments. This creates an urgent need for simplified, but at the same time sufficiently accurate, equivalent models. In this paper, we propose a numerical and analytical methodology for replacing corrugated sheeting with an equivalent orthotropic plate that reproduces the main characteristics of the sheet's bending stiffness in the main directions. Virtual experiments in the LIRA-SAPR environment allowed us to obtain the maximum deflections of the corrugated board under load along and across the stiffeners, which served as the basis for calculating the equivalent elastic moduli, Poisson's ratio, and shear modulus. The verification of the results confirms the ability of the orthotropic model to adequately reproduce not only the deformation behavior, but also allows for the assessment of the strength of the profiled plate under a typical load. The developed approach allows engineers to use simpler plate models in design calculations without losing accuracy, which is especially valuable in problems with a large number of elements. The usefulness of the proposed model will be especially noticeable when modeling large areas of roof coverings and in optimization design, where speed and computing resources are critical. The developed model allows us to effectively assess the permissible loads on corrugated board according to the criteria of maximum deflection and strength, taking into account the options for support and the length of the spans.

Keywords: metal structures, profile, stiffness, corrugated board, numerical model, orthotropic plate

УДК 624.9

А. С. Величкович

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2685-8753>

Кафедра будівництва

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15,
Івано-Франківськ, Україна, 76019

А. В. Андрусак*

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2099-9045>

Кафедра будівництва

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15,
Івано-Франківськ, Україна, 76019

Д. В. Сільчук

студент групи Бм-24-1, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0476-4361>

Кафедра будівництва

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15,
Івано-Франківськ, Україна, 76019

*автор-кореспондент, e-mail: andriiandrusiak@gmail.com

Оцінка властивостей крупних заповнювачів із дроблених гірських порід західного регіону України для виготовлення бетонних сумішей

Цитувати як:

Величкович А. С., Андрусак А., Сільчук Д.В. (2025). Оцінка властивостей крупних заповнювачів із дроблених гірських порід західного регіону України для виготовлення бетонних сумішей. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 23, 89-104.
[https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-09](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-09)

© 2025, Величкович А. С., Андрусак А., Сільчук Д.В.

У статті досліджено фізико-механічні властивості крупного заповнювача, отриманого шляхом дроблення осадових і магматичних гірських порід, що широко використовуються в будівельній галузі західного регіону України. Було оцінено ключові параметри, такі як щільність, пористість, міцність на стиск та розкол, гранулометричний склад, глинисті та пилоподібні частинки, а також форма зерен, які мають критичний вплив на якість бетонних сумішей. У дослідженні розглянуто п'ять видів заповнювачів різного мінералогічного походження, включаючи гранітні, гравійні, піскові та андезитові матеріали. Виявилось, що їх фізико-механічні властивості залежать не лише від мінералогічного складу, але й від умов формування, методів видобутку та технологічної обробки. Порівняльний аналіз показав, що гранітний щебінь загалом демонструє кращі фізико-механічні характеристики, включаючи високу міцність, низький вміст шкідливих домішок та оптимальний гранулометричний склад, що забезпечує рівномірний розподіл напружень у бетоні та сприяє довговічності конструкцій. Водночас інші види заповнювачів можуть бути конкурентоспроможними завдяки своїй економічній доцільності та доступності, що робить їх ефективною альтернативою для різних

класів бетону залежно від вимог проекту. У дослідженні також враховуються екологічні аспекти використання місцевої сировини, що сприяє зменшенню вуглецевого сліду будівництва за рахунок зниження логістичних витрат та раціоналізації використання природних ресурсів. Крім того, розглянуто можливості підвищення ефективності використання заповнювачів шляхом їх модифікації, зокрема використання поверхневих обробок для покращення адгезії до цементного каменю. Представлені результати мають практичне значення для оптимізації складу бетонних сумішей, розробки нормативних вимог до якості заповнювачів та підвищення технологічності бетонних конструкцій. Результати дослідження можуть бути використані проектними організаціями, виробниками бетонних виробів та будівельними компаніями для підвищення ефективності виробництва, забезпечення довговічності будівельних проектів та зменшення впливу будівельної галузі на навколишнє середовище.

Ключові слова: заповнювач, щебінь, гравій, будівельний матеріал, граніт, бетон

Вступ

Будівельна галузь є однією з ключових сфер економіки країни, що безпосередньо впливає на розвиток інфраструктури та соціально-економічний прогрес. На сьогодні найважливішим будівельним матеріалом є бетон, якість якого значною мірою визначається властивостями крупних заповнювачів [1, 2].

Крупні заповнювачі зазвичай поділяють на природні, штучні та отримані з промислових відходів [3]. До природних належать гравій і щебінь, які отримують із магматичних (граніт, базальт, діабаз), осадових (вапняк, пісковик, черепашник) та метаморфічних порід. Окрім дроблених матеріалів у бетонних сумішах застосовують морську й річкову гальку, а для легких бетонів – пористі вулканічні породи, зокрема пемзу [4]. Штучні заповнювачі отримують термічною або хімічною обробкою природної сировини. До них відносять керамзит, спучений перліт, аглопорит і спучений сланець, що характеризуються низькою густиною та пористістю [5]. Альтернативу природному каменю становлять крупні заповнювачі з промислових відходів, зокрема металургійні та доменні шлаки, геополімерний заповнювач, перероблений бетон і цегла, що сприяє ресурсозбереженню й утилізації відходів [6].

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Західний регіон України має значні поклади осадових та магматичних гірських порід, що використовуються у виробництві крупних заповнювачів для бетонів. Серед основних видів сировини виділяють граніти, гравій, пісковики, вапняки та андезити, які формують сировинну базу для будівельної галузі. Однак фізико-механічні характеристики цих матеріалів залежать не лише від їхнього мінералогічного складу, але і від умов формування порід, методів видобутку та технологічної обробки [7, 8]. Зокрема, граніти, що зазнали тривалих тектонічних навантажень, можуть мати підвищену

тріщинуватість, що знижує їхню міцність. Гравій, отриманий із руслових відкладень, характеризується природною округлістю зерен, що впливає на адгезію із цементним каменем, тоді як дроблений щебінь із пісковиків демонструє кращу зчеплюваність, але може мати вищу водопоглинальність тощо.

Дослідження показали, що мікро- та макроструктурні характеристики крупних заповнювачів – міцність, пористість, форма зерен, вміст домішок – визначають структуру міжфазної зони контакту та безпосередньо впливають на гідратацію цементу, розвиток мікротріщин і довговічність бетонних конструкцій [9, 10]. Оптимальний гранулометричний склад і текстурні особливості поверхні заповнювачів впливають на механічну стабільність матеріалу, сприяючи рівномірному розподілу напружень у бетоні та зменшенню концентрації локальних дефектів. Фізико-хімічні властивості заповнювачів також визначають їх взаємодії з цементним каменем, що може сприяти покращенню довговічності та водостійкості матеріалу [11, 12].

Зростає інтерес до альтернативних заповнювачів, зокрема рецикльованих матеріалів і промислових відходів, що дозволяє зменшити екологічне навантаження на довкілля та знизити вартість будівельних матеріалів. Проте їх взаємодія з цементним матриксом є складним процесом, що потребує регулярних досліджень і аналізу, оскільки варіативність властивостей таких заповнювачів може призводити до суттєвої зміни характеристик бетонних сумішей [13, 14]. Для досягнення необхідних властивостей бетону, використовуються карбоксиловмісні суперпластифікатори підвищують міцність і щільність структури, що покращує довговічність матеріалу [15]. Полімерні добавки також підвищують ефективність ін'єкційних технологій для заліковування тріщиноподібних дефектів [16], що сприяє розвитку теорії граничних станів конструкцій із тріщинами [17–19] та включеннями [20–22].

Дослідження крупних заповнювачів із осадових і магматичних порід є ключовим для раціонального використання місцевих ресурсів і зменшення логістичних витрат [23, 24].

Попри значну кількість досліджень у цій сфері, відсутні систематизовані дані щодо фізико-механічних характеристик крупних заповнювачів саме з гірських порід західного регіону України, а також їхнього впливу на якість бетонних сумішей. Крім того, існують розбіжності у літературі щодо переваг різних видів заповнювачів у контексті їх застосування для конструкцій різного призначення.

Мета і завдання дослідження. Метою даного дослідження є оцінка фізико-механічних властивостей крупних заповнювачів, отриманих шляхом дроблення осадових та магматичних гірських порід, з метою визначення їхньої придатності для виготовлення бетонних сумішей. Особливу увагу

приділено порівняльному аналізу різних типів заповнювачів та розробці рекомендацій щодо їх використання у будівельній практиці.

Матеріали та методи

У рамках даного дослідження було обрано шість найбільш поширених видів крупного заповнювача для бетонних сумішей, що видобуваються в західному регіоні України. До переліку відібраних матеріалів увійшли:

- щебінь гранітний Клесівський кар'єр нерудних копалин "Технобуд", Рівненська обл., Сарненський р-н, смт. Клесів (зразок 1, рис. 1);
- щебінь гранітний "АТ Коростенський гранітний кар'єр", Житомирська обл., м. Коростень (зразок 2, рис. 2);
- щебінь гравійний ТОВ "Гравел груп", Івано-Франківська обл., Надвірнянський р-н, с. Фитьків (зразок 3, рис. 3);
- щебінь гравійний "Майдан-іспаський кар'єр піщано-гравійної суміші", Чернівецька обл., Вижицький р-н, с. Іспас (зразок 4, рис. 4);
- щебінь пісковик ТДВ "Надвірнянський кар'єр – Карпати", Івано-Франківська обл., Надвірнянський р-н, с. Пасічна (зразок 5, рис. 5);
- щебінь андезитовий ПрАТ "Хустський кар'єр", Закарпатська обл., Хустський р-н, с. Рокосово (зразок 6, рис. 6).

Для забезпечення об'єктивності дослідження відбір проб заповнювачів здійснювався відповідно до чинних державних стандартів, зокрема ДСТУ Б В.2.7-71-98 "Будівельні матеріали. Щебінь і гравій із природного каменю для будівельних робіт. Технічні умови". Відбір проб проводився шляхом рівномірного змішування матеріалу, відібраного з різних ділянок складування та транспортування, що дозволило отримати репрезентативні зразки кожного виду заповнювача.

Для оцінки фізико-механічних властивостей крупних заповнювачів було проведено низку лабораторних випробувань, що дозволяють визначити їх якісні характеристики та оцінити придатність до використання в бетонних сумішах. Методика дослідження передбачала виконання наступного комплексу експериментальних процедур.

Визначення зернового складу щебеню – гранулометричний аналіз шляхом просіювання матеріалу через набір сит для оцінки рівномірності розподілу частинок різних фракцій, що є критично важливим для щільності бетонної структури та її механічних властивостей.

Визначення дробимості – оцінка міцності зерен шляхом їх навантаження до руйнування для визначення стійкості матеріалу до механічного впливу.



Рис. 1. Щебінь гранітний смт.
Клесів



Рис. 2. Щебінь гранітний
м. Коростень



Рис. 3. Щебінь гравійний,
с. Фитьків



Рис. 4. Щебінь гравійний,
с. Іспас



Рис. 5. Щебінь пісковик,
с. Пасічна



Рис. 6. Щебінь андезитовий,
с. Рокосово

Визначення вмісту пилуватих та глинистих частинок (метод відмулювання) – аналіз кількості тонкодисперсних включень, що можуть знижувати зчеплення заповнювача з цементним каменем.

Визначення вмісту зерен пластинчастої (лещадної) та голчастої форм – оцінка частки зерен з невідповідною геометрією, що може порушувати структуру бетонного скелету та знижувати його міцність.

Визначення середньої щільності – розрахунок щільності матеріалу на основі вимірювання маси та об'єму твердих частинок заповнювача, що впливає на розрахунок складу бетонної суміші.

Визначення насипної щільності – визначення об'ємної маси заповнювача в природному стані, що впливає на дозування компонентів бетонної суміші.

Визначення вологості матеріалу – оцінка вмісту води у заповнювачі для коригування водоцементного співвідношення в бетонних сумішах.

Комплексний аналіз отриманих результатів дозволить обґрунтовано визначити оптимальні типи крупного заповнювача для використання в умовах конкретних будівельних проєктів. Порівняння фізико-механічних характеристик різних матеріалів дозволить не лише забезпечити відповідність нормативним вимогам, а й оптимізувати склад бетонних сумішей для підвищення довговічності та експлуатаційної надійності конструкцій.

Результати та обговорення

На основі проведених випробувань було складено протоколи, основні результати яких представлено в таблицях 1 і 2 та на діаграмах зернового складу усіх досліджених зразків.

Одним із ключових параметрів, що визначають якість крупних заповнювачів, є їх дробимість, яка характеризує здатність матеріалу чинити опір механічним впливам, таким як стирання та руйнування під дією навантажень. Висока стійкість до дроблення є важливою для довговічності бетону, особливо в умовах інтенсивних експлуатаційних навантажень.

За підсумками дослідження дробимості (рис. 7) у табл. 1 та 2 для кожного зразка заповнювача подано два числові значення: відсоткове співвідношення дроблених частинок після випробування (чим менше це значення, тим вища стійкість заповнювача до дроблення); показник марки дробимості (значення в дужках), який визначає міцність матеріалу за стандартизованою класифікацією.



Рис. 7. Процес визначення дробимості крупного заповнювача

Таблиця 1. Фізико-механічні властивості заповнювачів (зразки 1–3)

Назва показника, що визначається	Одиниці виміру	Вимоги НД	Отримане значення	Нормативний документ на методи випробувань
<i>Гранітний щебінь Клевівський кар'єр нерудних копалин "Технобуд" (зразок 1)</i>				
Насипна щільність	кг/м ³	–	1556	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.17
Марка за дробильністю	%	–	2,65 (1200)	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.8 ДСТУ Б В.2.7-75-98 п.4.3.4
Вміст пилюватих і глинистих частинок	%	≤1,0	0,96	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.5 ДСТУ Б В.2.7-75-98 п.4.7.1
Зерна пластинчастої і голчастої форм	%	≤35,0	8,67	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.7 ДСТУ Б В.2.7-75-98 п.4.3.3
Середня щільність	кг/м ³	–	2712	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.16
<i>Гранітний щебінь "АТ Коростенський гранітний кар'єр" (зразок 2)</i>				
Насипна щільність	кг/м ³	–	1451	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.17
Марка за дробильністю	%	–	10,71 (1200)	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.8 ДСТУ Б В.2.7-75-98 п.4.3.4
Вміст пилюватих і глинистих частинок	%	≤1,0	0,28	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.5 ДСТУ Б В.2.7-75-98 п.4.7.1
Зерна пластинчастої і голчастої форм	%	≤35,0	7,21	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.7 ДСТУ Б В.2.7-75-98 п.4.3.3
Середня щільність	кг/м ³	–	2620	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.16
<i>Щебінь гравійний ТОВ "Гравел груп" (зразок 3)</i>				
Насипна щільність	кг/м ³	–	1456	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.17
Марка за дробильністю	%	–	10,69 (800)	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.8 ДСТУ Б В.2.7-75-98 п.4.3.4
Вміст пилюватих і глинистих частинок	%	≤1,0	0,76	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.5 ДСТУ Б В.2.7-75-98 п.4.7.1
Зерна пластинчастої і голчастої форм	%	≤35,0	17,6	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.7 ДСТУ Б В.2.7-75-98 п.4.3.3
Середня щільність	кг/м ³	–	2593	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.16

Таблиця 2. Фізико-механічні властивості заповнювачів (зразки 4–6)

Назва показника, що визначається	Одиниці виміру	Вимоги НД	Отримане значення	Нормативний документ на методи випробувань
<i>Щебінь гравійний "Майдан-іспаський кар'єр піщано-гравійної суміші" (зразок 4)</i>				
Насипна щільність	кг/м ³	–	1464	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.17
Марка за дробильністю	%	–	17,88 (600)	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.8 ДСТУ Б В.2.7-75-98 п.4.3.4
Вміст пилюватих і глинистих частинок	%	≤1,0	1,1	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.5 ДСТУ Б В.2.7-75-98 п.4.7.1
Зерна пластинчастої і голчастої форм	%	≤35,0	8,72	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.7 ДСТУ Б В.2.7-75-98 п.4.3.3
Середня щільність	кг/м ³	–	2555	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.16
<i>Щебінь пісковик ТДВ "Надвірнянський кар'єр – Карпати" (зразок 5)</i>				
Насипна щільність	кг/м ³	–	1337	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.17
Марка за дробильністю	%	–	9,65 (1200)	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.8 ДСТУ Б В.2.7-75-98 п.4.3.4
Вміст пилюватих і глинистих частинок	%	≤1,0	0,54	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.5 ДСТУ Б В.2.7-75-98 п.4.7.1
Зерна пластинчастої і голчастої форм	%	≤35,0	44,1	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.7 ДСТУ Б В.2.7-75-98 п.4.3.3
Середня щільність	кг/м ³	–	2644	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.16
<i>Щебінь андезитовий ПрАТ "Хустський кар'єр" (зразок 6)</i>				
Насипна щільність	кг/м ³	–	1372	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.17
Марка за дробильністю	%	–	12,33 (1000)	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.8 ДСТУ Б В.2.7-75-98 п.4.3.4
Вміст пилюватих і глинистих частинок	%	≤1,0	0,77	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.5 ДСТУ Б В.2.7-75-98 п.4.7.1
Зерна пластинчастої і голчастої форм	%	≤35,0	28,4	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.7 ДСТУ Б В.2.7-75-98 п.4.3.3
Середня щільність	кг/м ³	–	2466	ДСТУ Б В.2.7-32-95 п.4.16

Отже, найвищу стійкість до дроблення продемонстрував зразок 1 (2.65%), що відповідає марці дробимості 1200. Це свідчить про високу міцність матеріалу, що робить його придатним для використання в конструкціях, які зазнають значних навантажень, таких як мости, аеродромні покриття та висотні будівлі. Помірну стійкість до дроблення показали зразки 2 (10.71%), 5 (9.65%) та 6 (12.33%), які також мають порівняно хороші характеристики дробимості, а їх показники знаходяться в межах марок 1000–1200. Вони можуть бути використані в бетонних конструкціях загального призначення, включаючи житлове та комерційне будівництво. Підвищену дробимість продемонстрував зразок 3 (10.69%), що відповідає марці 800. Це вказує на дещо нижчу міцність у порівнянні з попередніми зразками. Низьку стійкість до дроблення показав зразок 4 (17.88%), що відповідає марці 600. Це означає, що даний заповнювач

схильний до значного руйнування під дією навантажень, що обмежує його застосування у високоміцних конструкціях. Він може бути використаний лише в елементах, які не зазнають значних механічних впливів, наприклад, у ненавантажених бетонних блоках.

Зерновий склад крупного заповнювача є одним із ключових параметрів, що визначає його придатність для використання в бетонних сумішах, оскільки впливає на щільність укладки зерен, водопотребу суміші та фізико-механічні властивості затверділого бетону. Результати гранулометричних досліджень подано на рис. 8–13.

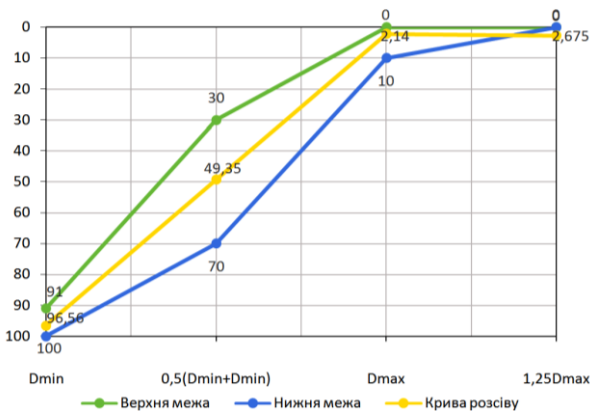


Рис. 8. Гранулометричний аналіз гранітного щебеню смт. Клесів (зразок 1)

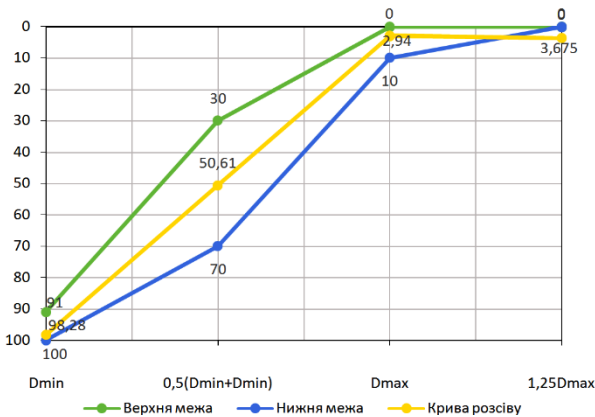


Рис. 9. Гранулометричний аналіз гранітного щебеню м. Коростень (зразок 2)

Для визначення гранулометричного складу крупних заповнювачів було проведено лабораторні випробування відповідно до чинних стандартів. Експериментальна методика передбачала розподіл проби заповнювача за фракціями шляхом просіювання через набір сит із круглими отворами (25 мм, 20 мм, 10мм, 5 мм, 2.5 мм, 1.25 мм). Відбір проби масою 10 кг для кожного заповнювача проводився методом квартування, що забезпечує репрезентативність отриманих результатів. Відібрану пробу висушували до постійної маси при температурі 105 ± 5 °C відповідно до встановлених методичних вимог. Після просіювання визначали масу залишків на кожному ситі, далі розраховували їхню відносну частку у відсотках від загальної маси проби, а також повні залишки – сумарну частку матеріалу, що залишається на даному ситі та всіх ситах з більшим розміром отворів. Графічні інтерпретації отриманих даних представлені у вигляді діаграм зернового складу. На осі абсцис графіків позначено розміри сит, що відповідають контрольним отворами D_{min} , $0.5(D_{max} + D_{min})$, $1.25D_{max}$. На осі ординат відкладено величини повних залишків у відсотках. Загалом, якість зернового складу крупного заповнювача оцінювали за значеннями повних залишків на ситах з контрольними отворами.

Усі представлені діаграми (рис. 8 – рис. 13) містять три криві: верхню межу (зелена лінія), яка визначає граничний рівень залишків для допустимого зернового складу; нижню межу (синя лінія), що відображає мінімально допустимі значення; фактичну криву розсіву (жовта лінія), яка характеризує реальний гранулометричний склад дослідженого матеріалу.

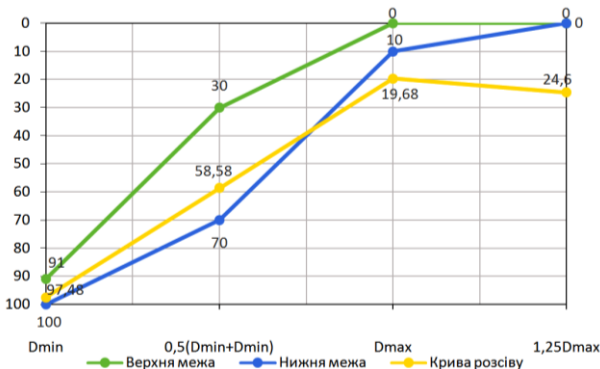


Рис. 10. Гранулометричний аналіз гравійного щебеню с. Фитьків (зразок 3)

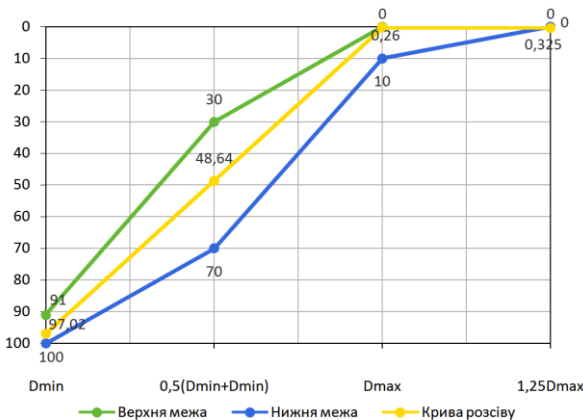


Рис. 11. Гранулометричний аналіз гравійного щебеню с. Іспас (зразок 4)

Для прикладу проаналізуємо діаграму, зображену на рис. 8. При D_{min} (найменшому контрольному отворі сит) залишок становить 96,56%, що свідчить про високий вміст крупних зерен у матеріалі. Це значення знаходиться між нормативними межами: верхня межа залишків становить 91%, а нижня – 100%. Відхилення від верхньої межі (на 5,56%) вказує на те, що матеріал містить менше дрібних зерен ніж це допускається стандартом і загалом залишається в межах допустимого діапазону. При середньому контрольному отворі сит $0,5(D_{max} + D_{min})$, залишок на ситі суттєво зменшився, склавши близько 49,35%. Це свідчить про значну частку зерен середнього розміру у матеріалі, що забезпечує хорошу рівномірність розподілу фракцій. При D_{max} залишки різко зменшилися до 2,14%, що підтверджує відсутність надлишку великих зерен у пробі. Такий розподіл є типовим для добре градуйованого матеріалу з переважним вмістом середніх фракцій. При $1,25D_{max}$ залишок становить 2,675%, при цьому значення верхньої і нижньої меж – 0%. Оскільки згідно чинних ДСТУ/EN нормативний ліміт залишку на контрольному ситі $1,25D_{max}$ становить 5%, фактичне значення 2,675% відповідає вимогам і не перевищує допустиму межу відхилення. Це свідчить про відповідність матеріалу класу щебеню 10–20 мм.

Аналогічним чином проаналізували зерновий склад усіх заповнювачів. У двох випадках на контрольному ситі $1,25D_{max}$ мали перевищення нормативного ліміту залишку 5%. Ймовірно це може негативно вплинути на працездатність бетонної суміші – ускладнене ущільнення, зниження однорідності, дефекти структури затверділого бетону тощо.

В такому разі можливі наступні варіанти дій. Додаткове просіювання заповнювача для вилучення надмірно великих зерен. Змішування з дрібнішою фракцією для балансування зернового складу. Зміна режиму дроблення – коригування параметрів дробильного обладнання для отримання більш рівномірного зернового складу. Обмежене використання в бетоні – застосування такого заповнювача лише для грубих, низькочутливих конструкцій (наприклад, для масивних елементів, або неструктурних елементів – перегородок, облицювання, не несучих стін, стяжок підлог тощо). Перегляд поставок – у разі систематичного перевищення слід розглянути альтернативних постачальників.

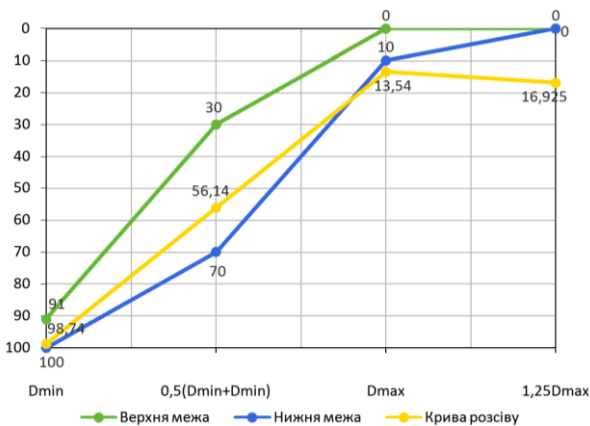


Рис. 12. Гранулометричний аналіз щебеню піщавика с. Пасічна (зразок 5)

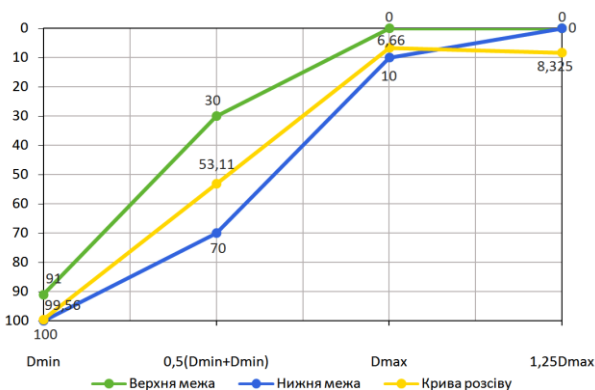


Рис. 12. Гранулометричний аналіз андезитового щебеню с. Рокосово (зразок 6)

Висновки

У ході проведеного дослідження здійснено експериментальне випробування та порівняльний аналіз фізико-механічних характеристик крупних заповнювачів, отриманих із осадових та магматичних гірських порід західного регіону України. Дослідження охопило шість видів заповнювачів, серед яких гранітні, гравійні, пісковикові та андезитові матеріали.

Результати експериментального аналізу засвідчили, що найбільш ефективним заповнювачем є гранітний щебінь, зокрема матеріал, видобутий на Клесівському кар'єрі нерудних копалин “Технобуд” (Рівненська область, Сарненський район, смт. Клесів). Висока якість цього матеріалу зумовлена його оптимальним зерновим складом, низьким вмістом глинистих і пілуватих часток, а також незначною кількістю зерен лещадної та голчастої форми. Сукупність зазначених властивостей дозволяє забезпечити раціональну рецептуру бетонної суміші, що позитивно впливає на технологічність процесу виготовлення бетонних виробів, сприяючи їхній довговічності та економічній ефективності.

Як потенційні альтернативи можуть розглядатися гранітний щебінь із Коростенського гранітного кар'єру (Житомирська область, м. Коростень) та гравійний щебінь, що видобувається компанією “Гравел Груп” (Івано-Франківська область, Надвірнянський район, с. Фитьків). Хоча фізико-механічні властивості цих матеріалів дещо поступаються характеристикам щебеню з Клесівського родовища, їх використання може бути економічно доцільним завдяки нижчій вартості, що є важливим фактором при розробці бетонних сумішей для масового будівництва. Інші досліджені заповнювачі можуть ефективно використовуватися у менш відповідальних конструкціях, зокрема в неструктурних елементах, дорожніх та гідротехнічних покриттях, а також як компонент змішаних заповнювачів.

Отримані результати підкреслюють перспективність використання місцевих сировинних ресурсів як ефективного, економічно виправданого та екологічно безпечного рішення для будівельної галузі.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

Література

1. Golewski G. L. Effect of Coarse Aggregate Type on the Fracture Toughness of Ordinary Concrete. *Infrastructures*. 2024. Vol. 9, no. 10. P. 185. <https://doi.org/10.3390/infrastructures9100185>
2. Tadesse Abegaz G., Khan I., Mosisa Legese A. Investigating the Effects of Coarse Aggregate Physical Properties on Strength of C-25 Concrete. *American Journal of Engineering and Technology Management*. 2020. Vol. 5, no. 5. P. 84. <https://doi.org/10.11648/j.ajetm.20200505.12>
3. Natural aggregates used for lightweight concrete – A Review / D. S. Vijayan et al. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 993. P. 012042. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/993/1/012042>
4. Tanyildizi M., Gökalp İ. Utilization of pumice as aggregate in the concrete: A state of the art. *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 377. P. 131102. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131102>
5. Kuna E., Böggly G. Overview of mechanical degradation of aggregates, related standards, and the empirical relations of the parameters. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2024. Vol. 83, no. 7. <https://doi.org/10.1007/s10064-024-03754-2>
6. Bardan M., Czarnecki L. Green Recycled Aggregate in Concrete: Feasibility Study. *Materials*. 2025. Vol. 18, no. 3. P. 488. <https://doi.org/10.3390/ma18030488>
7. Telloli C., Aprile A., Marrocchino E., Petrographic and Physical-Mechanical Investigation of Natural Aggregates for Concrete Mixtures. *Materials*. 2021. Vol. 14, no. 19. P. 5763. <https://doi.org/10.3390/ma14195763>
8. The Effect of Petrographic Characteristics and Physico-Mechanical Properties of Aggregates on the Quality of Concrete / P. Petrounias et al. *Minerals*. 2018. Vol. 8, no. 12. P. 577. <https://doi.org/10.3390/min8120577>
9. Deng P., Xu K., Guo S. Effects of coarse aggregate morphology on concrete mechanical properties. *Journal of Building Engineering*. 2022. P. 105408. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105408>
10. Meso-scale numerical simulation of the effect of aggregate strength on damage and fracture of high-strength concrete under dynamic tensile loading / X. Zhou et al. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2022. P. 103551. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2022.103551>
11. Golewski, G. L. Effect of Coarse Aggregate Grading on Mechanical Parameters and Fracture Toughness of Limestone Concrete. *Infrastructures*. 2023. Vol. 8. P. 117. <https://doi.org/10.3390/infrastructures8080117>
12. Three-dimensional quantification and classification approach for angularity and surface texture based on surface triangulation of reconstructed aggregates / C. Jin et al. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 246. P. 118120. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118120>
13. Ren Q., Pacheco J., de Brito J. Mesoscale modeling of recycled aggregate concrete: A parametric analysis of the quality and shape of aggregate. *Structural Concrete*. 2024. <https://doi.org/10.1002/suco.202400743>
14. Velychkovych A., Ropyak L., Dubei O. Strength Analysis of a Two-Layer PETF-Concrete Column with Allowance for Contact Interaction between

Layers. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 2021. P. 1–10. <https://doi.org/10.1155/2021/4517657>

15. Andrusyak A. V., Silchuk D. V., Velychkovych A. S. Assessment of the efficiency of designing the compositions of concrete mixtures using alternative aggregates from the natural resources of the Carpathian region. *Modern technologies and methods of calculations in construction*. 2024. No. 21. P. 15–28. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-11\(21\)-02](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-11(21)-02)

16. Shatskyi I., Kurtash I. Strength of Plate with the Filled Crack under Multiparameter Loading. *Procedia Structural Integrity*. 2018. Vol. 13. P. 1482–1487. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.12.305>

17. Shats'kyi I.P.; Makoviichuk M.V. Contact interaction of crack lips in shallow shells in bending with tension. *Materials Science*. 2005. Vol. 41. P. 486–494. <https://doi.org/10.1007/s11003-006-0006-8>

18. Stress Analysis in Damaged Pipeline with Composite Coating / M. Dutkiewicz et al. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. P. 10676. <https://doi.org/10.3390/app112210676>

19. Shats'kyi I.P., Makoviichuk M.V. Analysis of the limiting state of cylindrical shells with cracks about the contact of crack lips. *Strength of Materials*. 2009. Vol. 41. P. 560–565. <https://doi.org/10.1007/s11223-009-9166-8>

20. The stress-deformation state of an elastic half-space with a spheroidal thermal inclusion / V. S. Kolesov et al. *International Applied Mechanics*. 1992. Vol. 28, no. 7. P. 426–434. <https://doi.org/10.1007/bf00847125>

21. Shats'kyi I.P., Kundrat A.M. Longitudinal shear of a body with mutually immobile rigid collinear inclusions. *Materials Science*. 2004. Vol. 40, no. 3. P. 376–382. <https://doi.org/10.1007/s11003-005-0043-8>

22. Golewski, G. L. The Phenomenon of Cracking in Cement Concretes and Reinforced Concrete Structures. *Buildings*. 2023. Vol. 13, no. 3. P. 765. <https://doi.org/10.3390/buildings13030765>

23. Martynovych N., Boichenko E., Dielini M. Rebuilding of Ukraine After War: Special Restoration Regimes and Stimulation of Sustainable Development of Territories. *International Review for Spatial Planning and Sustainable Development*. 2023. Vol. 11, no. 4. P. 54–70. https://doi.org/10.14246/irspsd.11.4_54

24. Maya M., Parra J. L., Calvo B. Exploration of Natural Aggregates for a Sustainable Construction Industry in Western Colombia. *Minerals*. 2023. Vol. 13, no. 11. P. 1430. <https://doi.org/10.3390/min13111430>

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 19.02.2025	Received 19.02.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 27.04.2025	Received in revised form 27.04.2025
Прийнято 01.06.2025	Accepted 01.06.2025
Опубліковано 25.06.2025	Published 25.06.2025

A. S. Velychkovych

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2685-8753>

Department of Construction

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76019

A. V. Andrusiak*

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2099-9045>

Department of Construction

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76019

D. V. Silchuk

student of group B-21-2, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0476-4361>

Department of Construction

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76019

* corresponding author, e-mail: andriiandrusiak@gmail.com

Evaluation of the properties of coarse aggregates produced by the crushing of rocks in the western region of Ukraine for the production of concrete mixtures

How to Cite:

Velychkovych A. S., Andrusiak A. V., Silchuk D. V., (2025). Numerical modeling of load-bearing corrugated board using an equivalent orthotropic plate. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 23, 89-104. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-09](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-09)

Abstract. The article investigates the physical and mechanical properties of coarse aggregates obtained by crushing sedimentary and igneous rocks, which are widely used in the construction industry in the western region of Ukraine. Key parameters such as density, porosity, compressive and split strength, grain size distribution, clay and dusty particles, and grain shape, which have a critical impact on the quality of concrete mixtures, were evaluated. The study examined five types of aggregates of different mineralogical origin, including granite, gravel, sandstone, and andesite materials. It turned out that their physical and mechanical properties depend not only on the mineralogical composition, but also on the conditions of formation, mining methods, and technological processing. A comparative analysis showed that granite crushed stone generally demonstrates better physical and mechanical characteristics, including high strength, low content of harmful impurities, and optimal grain size distribution, which ensures an even distribution of stresses in concrete and contributes to the durability of structures. At the same time, other types of aggregates can be competitive due to their economic feasibility and availability, making them an effective alternative for different classes of concrete depending on project requirements. The study also takes into account the environmental aspects of using local raw materials, which helps to reduce the carbon footprint of construction by reducing logistics costs and rationalizing the use of natural resources. In addition, the possibilities of increasing the efficiency of aggregates by modifying them, in particular the use of surface treatments to improve adhesion to cement stone, are considered. The results presented are of practical importance for optimizing the composition of concrete mixtures, developing regulatory requirements for the quality of aggregates, and improving the manufacturability of concrete structures. The findings can be used by design organizations, concrete product manufacturers, and construction companies to improve production efficiency, ensure the durability of construction projects, and reduce the environmental impact of the construction industry.

Keywords: aggregate, crushed stone, gravel, building material, granite, concrete

УДК 624.012.035/625.07

Ю. Ю. Зятюк

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3831-6599>

Кафедра автомобільних доріг, основ та фундаментів

Національний університет водного господарства та природокористування, вул. Соборна, 11, Рівне, Україна, 33028

О. М. Поліщук

аспірант, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5700-8679>

Кафедра автомобільних доріг, основ та фундаментів

Національний університет водного господарства та природокористування, вул. Соборна, 11, Рівне, Україна, 33028

*автор-кореспондент, e-mail: o.m.polischuk@nuwm.edu.ua

Дослідження роботи фібробетону при використанні різних армуючих волокон

Цитувати як:

Зятюк Ю.Ю., Поліщук О.М. (2025). Дослідження роботи фібробетону при використанні різних армуючих волокон. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 23, 105-113. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-10](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-10)

© 2025, Зятюк Ю.Ю., Поліщук О.М.

Анотація. У статті наведено результати експериментального дослідження механічної поведінки фібробетону при використанні різних типів дисперсного армування, зокрема сталевих та поліпропіленових волокон. Основною метою дослідження є оцінка впливу виду та вмісту фібри на міцність при стиску, розтягу при згині, а також тріщиностійкість у режимі експлуатаційного навантаження. До основних переваг конструкцій на основі фібробетонів належать: зменшення трудовитрат на традиційні арматурні роботи, суміщення технологічних операцій процес приготування, армування, укладання та ущільнення відбувається одночасно.

Експериментальна програма побудована на основі математичного планування, що дало змогу скоротити обсяг випробувань і забезпечити достовірність отриманих результатів. Встановлено, що введення фібри суттєво підвищує пластичність і довговічність бетону, особливо за дії згинальних і циклічних навантажень. Показано, що комбіноване армування (сталевими та синтетичними волокнами) створює синергетичний ефект, який покращує здатність бетону до перехоплення тріщин і підвищує міцність його руйнування.

Застосування поліпропіленових волокон сприяє зменшенню водопроникності та покращує поведінку бетону в агресивному середовищі. Отримані результати підтверджують доцільність використання фібробетону як ефективного матеріалу для влаштування жорсткого дорожнього одягу та інших конструкцій, що працюють в умовах інтенсивного навантаження і несприятливого впливу зовнішнього середовища.

Збільшення вмісту фібри призводить до збільшення міцності при згині у всі терміни твердіння та має екстремальний характер, це свідчить про певні оптимальні витрати сталеві фібри (80...100 кг) та поліпропіленової (2...3 кг). Комбіноване застосування сталеві та поліпропіленові фібри дозволяє підвищити коефіцієнт ефективності дисперсного армування (співвідношення міцності на розтяг при згині до міцності при стиску).

Ключові слова: фібробетон, автомобільні дороги, аеродромне покриттях, фібра, міцність, стиск.

Вступ

Одним із ключових напрямів підвищення ефективності будівництва дорожніх і транспортних споруд є використання фібробетону як ефективного конструкційного матеріалу, що підтверджено начною кількістю робіт [1, 2]. Його використання дає змогу оптимізувати технологічний процес та зменшити витрати на всіх етапах виконання робіт проекту [1].

У якості армувальних елементів використовуються фібри з різноманітних матеріалів — зокрема сталеві, полімерні (поліпропіленові, поліетиленові, нейлонові, акрилові, поліефірні тощо), скляні, вуглецеві, базальтові, а також з азбесту та інших мінералів. Геометричні параметри фібри — довжина, діаметр, форма поперечного перерізу — підбираються відповідно до конкретних технічних вимог та умов експлуатації конструкції.

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми.

У дорожньому будівництві металеву фібру широко застосовують як засіб дисперсного армування бетону. Результати численних досліджень підтверджують її високу ефективність у покращенні таких показників, як міцність бетону на розтяг, тріщиностійкість, зносостійкість [3]. Зокрема, експериментальні дані [4, 5] засвідчили можливість зменшення товщини шару цементобетонного покриття без погіршення його експлуатаційних характеристик завдяки застосуванню сталеві фібри.

Під час вибору типу фібробетону потрібно відштовхуватись від вимог до матеріалу: сталеві фібра — для конструкцій з високими механічними навантаженнями, полімерна (поліпропіленова) — для агресивних середовищ, базальтова — при дії високих температур [2].

Полідисперсноармований фібробетон це бетон, у якому одночасно використовують металеві, полімерні чи базальтові волокна. Таке поєднання дозволяє компенсувати недоліки кожного з матеріалів і покращити міцність, тріщиностійкість та довговічність [6]. Переваги комбінованого фібробетону: підвищена міцність на розтяг та вигин, покращена еластичність бетонної суміші, зменшення тріщиноутворення, зниження ризику утворення мікротріщин; збільшення зносостійкості, збільшена

хімічна стійкість, підвищена ударостійкість – особливо доцільно для транспортних споруд, тунелів, дорожніх покриттів [7].

Як недоліки можна виділити: вища вартість – комбінований фібробетон дорожчий, ніж звичайний бетон або фібробетон з одним типом волокон; складність у приготуванні – необхідно правильно підбирати пропорції металевої та полімерної фібри для оптимального ефекту; необхідність додаткових досліджень – поки що немає універсальних стандартів для всіх типів конструкцій .

До основних переваг конструкцій на основі фібробетонів належать: зменшення трудовитрат на традиційні арматурні роботи, суміщення технологічних операцій — процес приготування, армування, укладання та ущільнення відбувається одночасно.

Мета і завдання дослідження. Основні дослідження були проведені з застосування математичного планування експерименту, що дозволило систематизувати виконання дослідів з точки зору як обсягу експериментальних робіт так і статистичних вимог [8]. Змінними факторами було обрано: вміст поліпропіленової фібри, (PF), кг/м^3 , ($X_1 = 2 \pm 1 \text{ кг/м}^3$), вміст сталевих фібри, (StF), кг/м^3 ($X_2 = 80 \pm 40 \text{ кг/м}^3$) (рис. 1). Отримані кількісні залежності, що характеризують вплив вмісту, сталевих та поліпропіленової фібри на –деформації зразків (рис. 3), міцність при стиску та розтягу при згині (рис. 4, 5).

Полідисперсне армування — це зміцнення цементних композиційних матеріалів, який полягає у поєднанні волокон різної природи, геометрії та функціонального призначення. Одночасне використання металевої фібри (довгої, жорсткої) та полімерної (гнучкої, ударопоглинаючої) дозволяє досягти синергетичного ефекту, де кожен тип фібри компенсує недоліки іншого. Таке комбіноване армування забезпечує: підвищення міцності на розтяг і згин; підвищення стійкості до руйнування (робота при деформаціях); підвищення тріщиностійкості, морозо- та зносостійкість.



Рис. 1. Армуючі волокна використанні в дослідженнях (анкерна та поліпропіленова фібри)

Суміш підібрана відповідно до ДСТУ Б В.2.7-215. Бетонування дослідних зразків: 18 кубів розмірами 10х10х10см, 9 призм розмірами 10х10х40см, 9 призм розмірами 15х15х60см, здійснювали у заздалегідь підготовленій металевій інвентарній опалубці, ущільнення виконували за допомогою вібростолу (рис. 2).



Рис. 2. Формування та випробування зразків із фібробетону



Рис. 3. Руйнування зразків зліва на право Пфб-2 із поліпропіленовою фіброю, Пфб-3 із комбінованою сталевую та поліпропіленовою фіброю

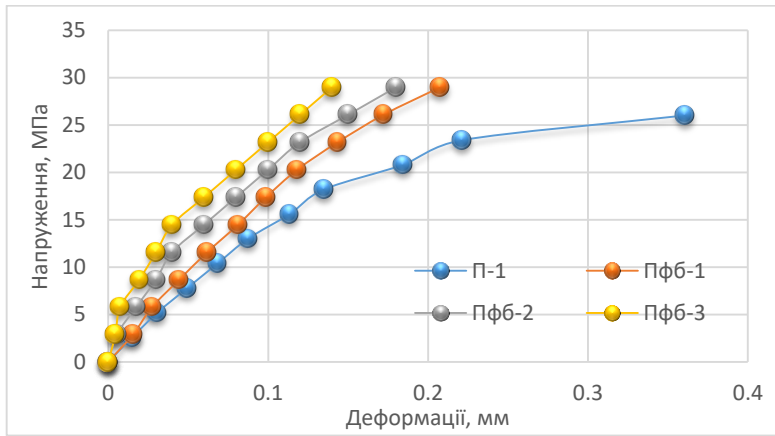


Рис. 4. Діаграма напруження-деформації зразків П-1 неармованого і зразків бетону армованого: Пфб-1 - сталевую фіброю, Пфб-2 поліпропіленовою фіброю, Пфб-3 комбінованою сталевую та поліпропіленовою фіброю

Поряд із міцністю при стиску та на розтяг при згині, одним з основних нормованих показників міцності фібробетонів є залишкова міцність на розтяг при згині. На рис.5 показано результати випробувань зразків-балок на розтяг при згині за чотирьох точковою схемою завантаження.

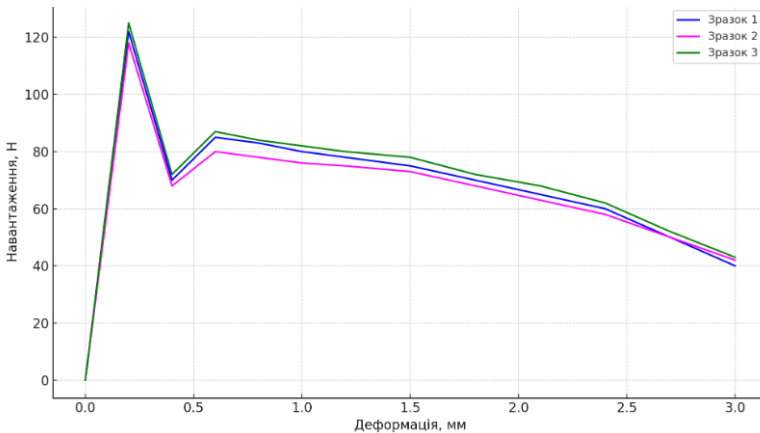


Рис. 5. Графік "навантаження-деформації" для зразків фібробетону: зразок 1- армований сталевую фіброю; зразок 2- армований поліпропіленовою фіброю; зразок 3- армований комбінованою сталевую та поліпропіленовою фібрами

Застосування поліпропіленових волокон також сприяє зменшенню водопроникності та покращує характеристики бетону в агресивному середовищі [6].

Отримані результати підтверджують доцільність використання фібробетону як ефективного матеріалу для використання його в жорсткому дорожньому одязі та інших конструкціях, що працюють в умовах інтенсивного навантаження та динамічних впливів.

Слід відмітити, що неармовані зразки мають крихке руйнування. Фібробетонні зразки руйнуються інакше, про що свідчить характер їх руйнування. Дане спостереження показує, що навіть після утворення тріщин, фібробетонний зразок має здатність нести певне навантаження. Це пояснюється тим, що якась частина волокон розривалася не в місці проходження тріщини, а в бетонній матриці і після цього, висмикувалася з бетону.

Висновки

Міцність у віці 28 діб фібробетонів становить 68...79 МПа при стиску та 12...18 МПа на згин при розтягу. Збільшення вмісту фібри призводить до збільшення міцності при згині у всі терміни твердіння та має екстремальний характер, це свідчить про певні оптимальні витрати сталеної фібри (80...100 кг) та поліпропіленової (2...3 кг).

Досліджено, що комбіноване застосування сталеної та поліпропіленової фібри дозволяє підвищити коефіцієнт ефективності дисперсного армування (співвідношення міцності на розтяг при згині до міцності при стиску). Полідисперсне армування фібробетону відкриває нові можливості для проектування довговічних конструкцій жорсткого дорожнього одязі, злітно-посадкових смуг, паркінгів, промислових підлог.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. Babych Y.M., Andriychuk O.V., Proektuvannya ta vyhotovlennya beznapirnykh trub iz stalefibrobetonu: Rekomendatsiyi. – Rivne: NUWEE, 2012. – s.31.
2. Drobyshynets' S.YA., Kyrychuk M.V. Perspektyvy vykorystannya stalefibrobetonu v dorozhn'omu budivnytstvi. Suchasni tekhnolohiyi ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi. 2017. № 6. С. 90–98. <https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/construction/issue/view/14/13>
3. Avishreshth S., Bansal P. P., Chopra T. Characterization of steel fiber reinforced pervious concrete for applications in low volume traffic roads. Urbanization Challenges in Emerging Economies: Resilience and Sustainability of Infrastructure. 2018. P. 93–102.
4. Elsaigh W.A., Kearsley E.P., Robberts J.M. Steel fibre reinforced concrete for road pavement applications. SATC 2005: Transport Challenges for 2010. P. 191–200.
5. Hussain I., Ali B., Akhtar T., Jameel M. S., Raza S. S. Comparison of mechanical properties of concrete and design thickness of pavement with different types of fiber-reinforcements (steel, glass, and polypropylene). Case Studies in Construction Materials. 2020. Volume 13, e00429. P. 1–10.
6. Dvorkin L.Y. Vysokomitsni shvydkotverdnuchi betony ta fibrobetony: monohrafiya / YE.M. Babych, V.V. Zhytkovs'kyi, O.M. Bordyuzhenko, S.V. Filipchuk, D.V. Kochkar'ov, I.V. Kovalyk, T.V. Koval'chuk, M.M. Skrypnyk // Rivne: NUWEE.– 2017. – 331 s.
7. Ziatyuk Y.Y., Borysyuk O.P. Advantages of using steel fiber concrete in road construction. Scientific foundations of solving engineering tasks and problems: collective monograph / International Science Group. – Boston: Primedia eLaunch, 2021. 160-168p. DOI- 10.46299/ISG.2021.MONO.TECH.II
8. Dvorkin L.Y. Rozv'yazuvannya budivel'no-tekhnolohichnykh zadach metodamy matematychnoho planuvannya eksperymentu / Dvorkin L.Y., Dvorkin O.L., Zhytkovs'kyi V.V. - Rivne: NUWEE, 2011- 174 s.

Література

1. Бабич Є.М., Андрійчук О.В. Проектування та виготовлення безнапірних труб із сталевібробетону: Рекомендації. – Рівне: НУВГП, 2012. – с.31.
2. Дробишинець С.Я., Киричук М.В. Перспективи використання сталевібробетону в дорожньому будівництві. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. 2017. № 6. С. 90–98. <https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/construction/issue/view/14/13>
3. Avishreshth S., Bansal P. P., Chopra T. Characterization of steel fiber reinforced pervious concrete for applications in low volume traffic roads. Urbanization Challenges in Emerging Economies: Resilience and Sustainability of Infrastructure. 2018. P. 93–102.

4. Elsaigh W.A., Kearsley E.P., Robberts J.M. Steel fibre reinforced concrete for road pavement applications. SATC 2005: Transport Challenges for 2010. P. 191–200.

5. Hussain I., Ali B., Akhtar T., Jameel M. S., Raza S. S. Comparison of mechanical properties of concrete and design thickness of pavement with different types of fiber-reinforcements (steel, glass, and polypropylene). Case Studies in Construction Materials. 2020. Volume 13, e00429. P. 1–10.

6. Дворкін Л.Й. Високоміцні швидкотверднучі бетони та фібробетони: монографія / С.М. Бабич, В.В. Житковський, О.М. Бордюженко, С.В. Філіпчук, Д.В. Кочкар'юв, І.В. Ковалик, Т.В. Ковальчук, М.М. Скрипник // Рівне: НУВГП.– 2017. – 331 с.

7. Зятюк Ю.Ю., Борисюк О.П. Переваги використання сталевіфібробетону в дорожньому будівництві.. Scientific foundations of solving engineering tasks and problems: collective monograph / International Science Group. – Boston: Primedia eLaunch, 2021. 160-168p. DOI- 10.46299/ISG.2021.MONO.TECH.II

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

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 19.05.2025	Received 19.05.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 23.05.2025	Received in revised form 23.05.2025
Прийнято 01.06.2025	Accepted 01.06.2025
Опубліковано 25.06.2025	Published 25.06.2025

Y. Y. Ziatyuk

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3831-6599>

Department of Automobile Roads, Bases, and Foundations

National University of Water and Environmental Engineering, Soborna St., 11, Rivne, Ukraine, 33028

O. M. Polischuk

Postgraduate, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5700-8679>

Department of Automobile Roads, Bases, and Foundations

National University of Water and Environmental Engineering, Soborna St., 11, Rivne, Ukraine, 33028

*corresponding author, e-mail: o.m.polischuk@nuwm.edu.ua

Investigation of the performance of fiber-reinforced concrete using different types of reinforcing fibers

How to Cite:

Ziatyuk, Y. Y., Polischuk, O. M. (2025). Investigation of the performance of fiber-reinforced concrete using different types of reinforcing fibers. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 23, 105-113. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-10](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-10)

Abstract. This article presents the results of an experimental study on the mechanical behavior of fiber-reinforced concrete using various types of dispersed

reinforcement, including steel, polypropylene fibers. The primary objective of the study is to evaluate the effect of fiber type and content on compressive strength, flexural tensile strength, and crack resistance under service load conditions. The main advantages of fiber-reinforced concrete structures include the reduction of labor costs associated with traditional reinforcement works and the integration of technological operations — the processes of mixing, reinforcing, placing, and compacting occur simultaneously.

The experimental program was based on the principles of mathematical planning, which allowed for a reduction in the volume of tests while ensuring the reliability of the results. It was found that the introduction of fibers significantly increases the ductility and durability of concrete, especially under flexural and cyclic loading.

The study demonstrated that combined reinforcement (with steel and synthetic fibers) creates a synergistic effect, improving the crack-bridging capacity of the concrete and increasing its fracture resistance. The use of polypropylene fibers contributes to a reduction in water permeability and enhances the concrete's performance in aggressive environments. The findings confirm the feasibility of using fiber-reinforced concrete as an effective material for rigid pavement structures and other construction elements subjected to intensive loading and adverse environmental conditions.

An increase in fiber content leads to an increase in flexural strength at all stages of hardening and demonstrates a non-linear (extremal) character. This indicates the existence of optimal dosages for steel fiber (80–100 kg) and polypropylene fiber (2–3 kg). The combined use of steel and polypropylene fibers allows for an increase in the efficiency coefficient of dispersed reinforcement, defined as the ratio of flexural tensile strength to compressive strength.

Keywords: fiber-reinforced concrete (FRC), road pavements, airfield pavement, reinforcing fiber, strength, compression.

УДК 625.7, 711

В. О. Івасенко*

Аспірант, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4795-5731>

Кафедра міського будівництва

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Чорноглазівська, 17, Харків, Україна, 61002

О. В. Завальний

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6191-2893>

Кафедра міського будівництва

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Чорноглазівська, 17, Харків, Україна, 61002

*автор-кореспондент, e-mail: vitaliy.ivasenko@gmail.com

Аналіз нормативних вимог щодо проєктування перетинів з урахуванням безпекових умов у міському середовищі

Цитувати як:

Івасенко, В. О., Завальний, О. В. (2025). Аналіз нормативних вимог щодо проєктування перетинів з урахуванням безпекових умов у міському середовищі. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 23, 114-122. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-11](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-11)

© 2025, Івасенко, В. О., Завальний, О. В.

Анотація. У статті наведено результати дослідження, щодо відмінності параметрів і елементів перетинів у населених пунктах під час проєктування або реконструкції, які нормуються законодавчими актами та різними будівельними нормами України. Підіймається проблематика неузгодженості нормативної літератури з Державними законами, правилами та стратегіями, які під час виконання проєктно-кошторисної документації викликає апріорі помилку у розробленні об'єктів вулично-дорожньому середовищі у населених пунктах різної величини (найкрупніших, крупніших; великих, середніх та малих міст, а також селищних населених пунктах). Проаналізовано наукові праці провідних вітчизняних вчених, які займаються постійними дослідженнями у містобудівній сфері та систематично підіймають питання аварійності на вулицях та дорогах населених пунктів. В дослідженні виявлено основні напрямки, які забезпечують обов'язкові безпекові умови для покращення проєктування та реконструкції перехресть на шляхах руху водіїв приватного транспорту, громадського (зокрема таксі) та спеціалізованих транспортних засобів. В статті зосереджено увагу до такого параметру, як «трикутник видимості», який є вкрай важливим під час розроблення проєктної документації. Виявлені напрямки та вимоги з яких формується цей параметр та наведені різні нормативні джерела, які є обов'язковими під час проєктування та реконструкції. Зроблено систематизацію та детальний опис з кожного напрямку, який детально описується. Показана головна невідповідність до вимог максимальної швидкості руху на вулично-дорожній мережі, що призводить до потенційних дорожньо-транспортних пригод на перетинах у містах і селищах.

Наведено чітку аргументацію, які наслідки можуть бути без гармонізації нормативно-правовими актами з будівельними нормами України.

Ключові слова: вулично-дорожнє середовище, дорожньо-транспортні пригоди, безпека, перетини / перехрестя в населених пунктах, «трикутник видимості», нормативні вимоги.

Вступ

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Сучасна тенденція щодо уваги до безпеки вулично-дорожнього середовища на перетинах набирає оберти, Україна, поки не має гармонізованих нормативних вимог і правил. Тому постає необхідність гармонізації нормативних вимог, які забезпечують параметри планування та реконструкції перехресть у населених пунктах. Проблемою безпечного вулично-дорожнього середовища займалися та продовжують досліджувати імовірні причини дорожньо-транспортних пригод (ДТП) у населених пунктах провідні науковці: Рейцен Є. О. розглядає проблеми при організації міського руху, безпеці дорожнього руху з урахуванням потреб пішоходів та громадського транспорту [1], Гук В. І. спеціалізується розробках стратегій та рекомендацій для підвищення безпеки на дорогах, зокрема в умовах інтенсивного міського трафіку [2], Осетрін М. М. займається покращенням існуючої нормативної бази та новітніх методів проектування і реконструкції транспортних систем міст [3]. В нашій Державі також створено законодавчі акти, стратегії та постанови [4-6] для зменшення ДТП в містах, проте більшість з них аналізує ДТП виключно по поведінці водія і пішоходів, а не відповідність середовища, яке може також бути причиною аварій. Тому, постає проблема в гармонізації законодавчо-правових актів з різними будівельними нормами.

Мета і завдання дослідження. Зменшення кількості потенційних ДТП на перехрестях за рахунок гармонізації Державних будівельних норм України, які стосуються проектування та реконструкції вулично-дорожньої мережі населених пунктів. Першим завданням є виявити розбіжності між законодавчими актами та нормативними вимогами України, друге – обґрунтувати зміни в нормативно-законодавчих документах.

Матеріали та методи

Для проведення дослідження були використані такі наукові методи дослідження: абстрагування, логічний наслідок, порівняння, опис, узагальнення, аналіз.

Результати та обговорення

Ще до початку повномасштабного вторгнення в Україні фіксувалася проблема збільшення дорожньо-транспортних пригод (ДТП) на

перехрестях в містах та селищах [7]. Кількість ДТП в населених пунктах у 2022 році була нижчою через людей, які вимушені були виїхати за кордон. З 2023 по 2025 кількість аварій починає зростати, тому постає необхідність проведення дослідження щодо різниці планувальних параметрів у законах та нормативних документах, які забезпечують заданий рівень безпеку руху в населених пунктах. Для цього було детально проаналізовано Державні будівельні нормативи України (ДБН) [8-9] та Державні стандарти України (ДСТУ) [10-11], щодо напрямів, які забезпечують обов’язкові вимоги щодо проектування та реконструкції перетинів (рисунок 1) та зазначено що ті ж самі вимоги містяться більш ніж в одному нормативному документі. Після цього аналізу більш детально розглянуто та проаналізовано нормативні вимоги щодо «трикутника видимості» (рисунок 2), як одного із таких що мають найбільший вплив на безпековий стан перетинів в міському середовищі.

Нормативні вимоги, які регламентують основні вимоги до безпеки дорожнього руху у населених пунктах		
Напрямок	Вимоги	Нормативні джерела
Геометричні параметри	Ширина проїзної частини, тротуарів, видимість, заокруглення, острівці безпеки	ДБН В.2.3-5:2018
Організація дорожнього руху	Знаки, розмітка, світлофори, камери, виділені смуги	ДСТУ 4100:2021, ДСТУ 3587:2022
Безпека пішоходів	Тротуари, переходи, освітлення, кнопкові світлофори	ДБН В.2.3-5:2018, ДБН В.2.5-28:2018
Обмеження швидкості та шуму	Обмеження швидкості, шумозахист, обмеження для вантажівок	ПДР України, ДБН В.1.1-7:2016
Інженерні рішення безпеки	Кільця, острівці, звуження проїзної частини, підвищені переходи	ДБН В.2.3-5:2018
Доступність для МГН	Занижені бордюри, тактильна плитка, пандуси, звукові сигнали	ДБН В.2.2-40:2018

Рис. 1. Нормативні вимоги, які регламентують основні вимоги до проектування та реконструкції вулиць і доріг населених пунктів в Україні

Нормативні параметри трикутника видимості			
Параметр	Позначення або значення	Опис	Нормативний документ
Висота ока водія	1,05 – 1,2 м	Визначає точку спостереження водія при виїзді на головну дорогу	ДБН В.2.3-5:2018
Відстань від ока до краю проїзної частини	~ 2,5 м	Відстань між водієм і межею проїзної частини головної дороги	ДБН В.2.3-5:2018
Висота об'єкта, який має бути видимим	0,1 – 1,0 м	Розрахункова висота іншого ТЗ, пішохода або велосипедиста	ДБН В.2.3-5:2018
Максимальна висота перешкод у трикутнику	до 1,0 м	Будь-які перешкоди вищі за 1 м вважаються такими, що обмежують огляд	ДБН В.2.3-5:2018
Мінімальна довжина сторони трикутника (S)	30 – 150 м	Залежить від швидкості руху на головній дорозі	ДБН В.2.3-5:2018, ДБН В.2.3-4:2015
Кут огляду	~ 90°	Орієнтовний горизонтальний кут для забезпечення видимості при виїзді	ДБН В.2.3-5:2018

Рис. 2. Параметри трикутника видимості з зазначенням нормативних вимог

Головна невідповідність до вимог чинного законодавства є максимальна швидкість руху у населених пунктах, що обмежена на рівні 50 км/год [12].

Постає проблема, що нормативні акти, які регулюють планувальні параметри значення швидкості не відповідають чинному законодавству (рис. 3). Щодо міст і селищ то значення швидкості майже на рівні з автомобільними дорогами, а це призводить до потенційних ДТП на перетинах вулично-дорожнього середовища.

Проаналізувавши ДБН, які регламентують значення для безпеки вулично-дорожнього руху було виявлено, що швидкісні розрахункові параметри в більшості адаптовані для автомобільних доріг загального користування, але в той же час вони використовуються в процесі проектування або реконструкції елементів вулично-дорожнього середовища, що закладає підвищену вірогідність ДТП.

Планувальні параметри трикутника видимості						
Параметр	Значення	Мінімальна довжина сторони трикутника (S)	Висота ока водія	Відстань від ока до краю дороги	Максимальна висота перешкод	Джерело
Швидкість на головній дорозі або вулиці	60, 50 км/год	30 м	1,05–1,2 м	2,5 м	до 1,0 м	ДБН В.2.3-5:2018
Швидкість на магістральній вулиці	80, 60 км/год	40 м	1,05–1,2 м	2,5 м	до 1,0 м	ДБН В.2.3-5:2018
Швидкість на магістральній дорозі	100, 60 км/год	60 м	1,05–1,2 м	2,5 м	до 1,0 м	ДБН В.2.3-5:2018
Швидкість на дорозі категорії I	130, 110 км/год	150 м	1,05–1,2 м	2,5 м	до 1,0 м	ДБН В.2.3-4:2015
Швидкість на дорозі категорії II, III, IV та V	90 км/год	100 м	1,05–1,2 м	2,5 м	до 1,0 м	ДБН В.2.3-4:2015

Рис. 3. Планувальні параметри трикутника видимості

Висновки

Було розглянуто невідповідність або відсутність гармонізації в нормативних актах, що застосовуються до проектування вулично-дорожньої мережі, може негативно впливати на безпеку дорожнього руху. Виявлено відсутність чітких, уніфікованих або адаптованих до типу середовища швидкісних обмежень може призвести до:

- недостатнього врахування функціонального призначення вулиць і дорожніх умов, що призводить до встановлення або занадто високих, або надто низьких обмежень швидкості;
- порушення принципу передбачуваності для учасників дорожнього руху, що ускладнює прийняття рішень водіями та пішоходами;
- зростання ризику ДТП, зокрема з тяжкими наслідками, адже перевищення швидкості є одним з основних чинників смертності на вулицях та дорогах в населених пунктах на перехрестях;
- невідповідність між проектною швидкістю дороги та фактично дозволеною, що дезорієнтує водіїв і знижує ефективність інженерних заходів з безпеки;
- відсутність зон диференційованого швидкісного режиму, особливо поблизу навчальних закладів, лікарень, житлових кварталів тощо.

Було отримано результат, що нормативні невідповідності сприяють зростанню кількості дорожньо-транспортних пригод, травматизму та смертності, особливо в умовах щільного та змішаного міського руху. Усе це суттєво ускладнює реалізацію політики нульової смертності (Vision Zero) та

знижує ефективність заходів з управління швидкістю – одного з ключових елементів забезпечення безпеки дорожнього руху в населених пунктах. Усунення таких розбіжностей шляхом гармонізації нормативної бази є ключовим кроком до підвищення рівня безпеки та створення безпечного транспортного середовища. Із таких що найбільше впливають на безпекові рішення можна виділити трикутник безпеки.

Враховуючи те, що Україна рухається до вступу в Європейський Союз (ЄС) та з метою зменшення кількості важких ДТП постає потреба внесення змін в нормативні документи різних рівнів, які нормують кількісні показники під час проектування та реконструкції перетинів в населених пунктах до зменшення швидкісного режиму у відповідність до норм ЄС, а також усунення розбіжностей у нормативних документах. Отже, для цього пропонується зменшити розрахункову швидкість до 50 км/год. для населених пунктів – це дозволить зменшити кількість ДТП на перетинах під час проектування або реконструкції на вулично-дорожній мережі.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

- 1.Reitsen, Ye. O. (2014). Orhanizatsiia i bezpeka miskoho rukhu: navchalnyi posibnyk [Organization and Safety of Urban Traffic: Textbook]. Kyiv: SIK GROUP UKRAINE LLC. [in Ukrainian]
- 2.Huk, V. I. (2010). Teoriia funktsionalnykh parametriv i kryterii otsinky staniv rukhu transportnykh potokiv na miskykh vulytsiakh i dorohakh [Theory of Functional Parameters and Criteria for Assessing Traffic Flow Conditions on Urban Streets and Roads: Doctoral dissertation in technical sciences, specialty 05.22.01 – Transport Systems]. Kyiv National University of Construction and Architecture. [in Ukrainian]
- 3.Osetrin, M. M., et al. (2021). Inzhenerne oblashtuvannia miskykh vulyts ta dorih [Engineering Equipment of Urban Streets and Roads: Textbook for students of specialty 192 "Construction and Civil Engineering", study program "Urban Construction and Management"]. Kyiv: KNUBA. ISBN 9778-966-627-235-8. [in Ukrainian]
4. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2020). Pro skhvalennia Stratehii pidvyshchennia rivnia bezpeky dorozhnoho rukhu v Ukraini na period do 2024 roku [On

the Approval of the Strategy to Improve Road Safety in Ukraine until 2024]. Order No. 1360-p, October 21, 2020. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1360-2020-p> [in Ukrainian]

5. Verkhovna Rada of Ukraine. (1993). Pro dorozhnii rukh [On Road Traffic]. Law of Ukraine No. 3353-XII, June 30, 1993. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3353-12> [in Ukrainian]

6. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2025). Pro pravyla dorozhnogo rukhu [On the Traffic Rules]. Resolution No. 1306, October 10, 2001, as of April 1, 2025. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1306-2001-п#Text> [in Ukrainian]

7. Opendatabot. (2025). Analityka [Analytics]. <https://opendatabot.ua/analytics/193-dtp-regions> (Accessed: April 25, 2025). [in Ukrainian]

8. DBN V.2.3-5:2018. Vulytsi ta doroih naselenykh punktiv [Streets and Roads of Settlements]. Effective from 01.09.2018. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2018. (State Building Codes of Ukraine) [in Ukrainian]

9. DBN V.2.3-4:2015. Avtomobilni doroih. Chastyna I. Proektuvannia. Chastyna II. Budivnytstvo [Automobile Roads. Part I. Design. Part II. Construction]. Effective from 01.04.2016. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2015. (State Building Codes of Ukraine) [in Ukrainian]

10. DSTU 4100:2021. Bezpeka dorozhnogo rukhu. Znaky dorozhni. Zahalni tekhnichni umovy. Pravila zastosuvannia [Road Traffic Safety. Road Signs. General Technical Requirements. Rules for Use]. Effective from 01.11.2011. Kyiv: Technical Committee for Standardization 'Highways and Transport Facilities' (TC 307), State Enterprise 'State Road Research Institute named after M. P. Shulgin' (DerzhdorNDI). (State Standards of Ukraine) [in Ukrainian]

11. DSTU 4100:2021. Bezpeka dorozhnogo rukhu. Avtomobilni doroih. Vymohy do ekspluatatsiinoho stanu [Road Traffic Safety. Motor Roads. Operational Condition Requirements]. Effective from 01.12.2022. Kyiv: TC 307, DerzhdorNDI. (State Standards of Ukraine) [in Ukrainian]

12. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2025). Pro pravyla dorozhnogo rukhu [On the Traffic Rules]. Resolution No. 1306, October 10, 2001, as of April 1, 2025. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1306-2001-%D0%BF#Text>. [in Ukrainian]

Література

1. Рейцен Є. О. Організація і безпека міського руху: навчальний посібник / Є. О. Рейцен. – К.: ТОВ «СІК ГРУП УКРАЇНА», 2014. – 454 с.

2. Гук В. І. Теорія функціональних параметрів і критеріїв оцінки станів руху транспортних потоків на міських вулицях і дорогах : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.01 – транспортні системи / Валерій Іванович Гук ; Київський національний університет будівництва і архітектури. – Київ, 2010. – 435 с.

3. Інженерне облаштування міських вулиць та доріг [Текст] : навч. посіб. для студентів спец. 192 «Будівництво та цивільна інженерія», які навчаються за ОПП

«Міське будівництво та господарство» / [М. М. Осетрін та ін.] ; Київ. нац. ун-т буд-ва і архітектури. - Київ : КНУБА, 2021. - 219 с. : рис., табл. - Бібліогр.: с. 209-212. - 30 прим. - ISBN 9778-966-627-235-8.

4. Про схвалення Стратегії підвищення рівня безпеки дорожнього руху в Україні на період до 2024 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 21 жовтня 2020 року № 1360-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1360-2020-%D1%80>.

5. Про дорожній рух: Закон України від 30 червня 1993 року № 3353-ХІІ. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3353-12>.

6. Про правила дорожнього руху : Постанова Кабінету міністрів України від 10.10.2001, № 1306 : станом на 01.04.2025. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1306-2001-%D0%BF#Text>. 2021. 10 жовт. 60 с.

7. Опендатбот. Аналітика. URL: <https://opendatabot.ua/analytics/193-dtp-regions> (дата звернення: 25.04.2025).

9. ДБН В.2.3-5:2018 Вулиці та дороги населених пунктів. – Чинний від 2018-09-01. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2018. – 55 с. (Державні будівельні норми України).

9. ДБН В.2.3-4:2015 Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво. – Чинний від 2016-04-01. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2015. – 104 с. (Державні будівельні норми України).

10. ДСТУ 4100:2021 Безпека дорожнього руху. Знаки дорожні. Загальні технічні умови. Правила застосування. – Чинний від 2011-11-01. – Київ : Технічний комітет стандартизації «Автомобільні дороги і транспортні споруди» (ТК 307), Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна» (ДП «ДерждорНДІ»), 2011. – 144 с. (Державні стандарти України).

11. ДСТУ 4100:2021 Безпека дорожнього руху. Автомобільні дороги. Вимоги до експлуатаційного стану. – Чинний від 2022-12-01. – Київ : Технічний комітет стандартизації «Автомобільні дороги і транспортні споруди» (ТК 307), Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна» (ДП «ДерждорНДІ»), 2022. – 103 с. (Державні стандарти України).

12. Про правила дорожнього руху : Постанова Кабінету міністрів України від 10.10.2001, № 1306 : станом на 01.04.2025. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1306-2001-%D0%BF#Text>. 2021. 10 жовт. 60 с.

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 23.05.2025	Received 23.05.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 28.05.2025	Received in revised form 28.05.2025
Прийнято 01.06.2025	Accepted 01.06.2025
Опубліковано 25.06.2025	Published 25.06.2025

V. O. Ivasenko

PhD Student, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4795-5731>

Department of Urban Construction

O.M.Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, Chornoglazivska Street, 17, Kharkiv, Ukraine, 61002

O. V. Zavalnyi

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6191-2893>
Department of Urban Construction

O.M.Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, Chornoglazivska Street, 17, Kharkiv, Ukraine, 61002

*corresponding author, e-mail: vitaliy.ivasenko@gmail.com

Analysis of regulatory requirements for the design of intersections with consideration of safety conditions in urban environments

How to Cite:

Ivasenko, V. O., Zavalnys, O. V. (2025). Analysis of regulatory requirements for the design of intersections with consideration of safety conditions in urban environments. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 23, 114-122. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-11](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-11)

Abstract. This article presents the findings of a study examining the inconsistencies in the design parameters and elements of intersections within urban areas in Ukraine, particularly during the planning or reconstruction stages. These parameters are regulated by a range of legislative acts and construction standards. The research highlights the problematic misalignment between regulatory literature and state laws, rules, and strategic frameworks, which inherently leads to errors in the development of street and road infrastructure across urban settlements of various sizes (metropolitan, large, medium, and small cities, as well as townships). The study draws on the work of leading Ukrainian researchers who consistently address urban development issues and traffic accident risks in urban road networks. Key directions have been identified to ensure mandatory safety conditions during the design and reconstruction of intersections used by private vehicles, public transport (including taxis), and specialized vehicles. Special attention is given to the "visibility triangle" parameter, a critical element in the preparation of design documentation, including during the reconstruction of intersections. The study outlines the components and regulatory sources that define this parameter, providing a comprehensive analysis and systematization of relevant requirements. Furthermore, it highlights a major discrepancy regarding speed regulations on urban road networks, which contributes to potential traffic accidents at intersections in cities and towns. The article substantiates the consequences of failing to harmonize construction norms with national legislative and regulatory frameworks.

Keywords: urban street and road environment, road traffic accidents, safety, intersections in urban areas, visibility triangle.

УДК 697.1:004.942

Н. В. Коменда*

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5944-8665>

Кафедра електричної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

І. В. Грицюк

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4472-306X>

Кафедра електричної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

В. І. Волинець

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9192-2785>

Кафедра електричної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

А. В. Гадай

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4195-7218>

Кафедра електричної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

Д. Т. Коменда

аспірант третього року навчання

спеціальності прикладна математика

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

* автор-кореспондент, e-mail: nykomenda@gmail.com

Наукові підходи до оцінки енергоефективності будівель

Цитувати як:

Коменда, Н. В., Грицюк, І. В., Волинець, В.І., Гадай, А. В., Коменда, Д.Т. (2025). Наукові підходи до оцінки енергоефективності будівель. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 23, 123-131. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-12](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-12)

© 2025, Коменда, Н. В., Грицюк, І. В., Волинець, В.І., Гадай, А. В., Коменда, Д.Т.

Анотація. У роботі розглянуто актуальні наукові підходи до визначення енергоефективності будівель у сучасних умовах. Це стає все більш важливим завданням у контексті сталого розвитку та глобального переходу до використання енергоощадних технологій. Зростання вимог щодо зменшення споживання енергетичних ресурсів та покращення якості середовища всередині будинків зацікавлюють застосування новаторських методик у сфері енергетичного моделювання та аналізу. У роботі проаналізовано ключові методи, серед яких математичне моделювання - ефективний спосіб прогнозування енергоспоживання будівель, що базується на створенні детальних фізичних моделей теплових і

енергетичних процесів. Це дозволяє враховувати конструктивні особливості будівлі, кліматичні умови, режими експлуатації тощо.

На особливу увагу заслуговує застосування штучного інтелекту і його алгоритмів машинного навчання в технологіях глибокого навчання та штучних нейронних мереж. Це дозволяє автоматично обробляти великі обсяги даних з сенсорів та систем моніторингу і дистанційного зондування. Такий підхід сприяв покращенню точності прогнозувань та адаптивності моделей до реальних умов. Крім цього, досліджено сучасні методи оцінки енергоефективності на основі порівняльного аналізу фактичного енергоспоживання з прогнозованими показниками. У статті детально розглянуто можливості використання дистанційного зондування Землі для виявлення теплових втрат, дефектів у конструкціях та оцінки енергетичного стану будівель на основі інформаційних матеріалів, отриманих за допомогою супутникових або аерофотознімків.

Особлива увага приділялася поширенню використання технологій моделювання інформаційних систем будівництва (Building Information Modeling, BIM) разом з методами аналізу життєвого циклу (Life Cycle Assessment, LCA), що дозволяють оцінити енергоефективність на всіх етапах життя будинку - від концепційного стадіону через проектування та будівництво до експлуатаційного перебування та ремонту.

Обговорено можливості подальшого розвитку вищезазначених підходів у контексті цифрової трансформації будівельної галузі. Це включає у себе впровадження "розумних" систем управління будинками (Smart Building Systems), інтеграцію з Internet of Things (IoT) та важливість дотримання сучасних європейських та міжнародних стандартів щодо енергоефективності.

Ключові слова: енергоефективність, штучний інтелект, енергомоделювання, DEA, BIM, життєвий цикл, LCA, дистанційне зондування.

Вступ

Енергозбереження у будівництві вважають одним із важливих аспектів у контексті сталості міського планування з точки зору екологічності та економічності. Покращення енергоефективності у будинках грають значущу роль у досягненні цілей сталого розвитку, зменшенні викидів парникових газів та забезпеченню енергетичною безпекою. З урахуванням зростання вимог до зниження споживання енергії та викидів CO₂, появляються потреби у використанні комплексних підходів до оцінки енергетичних характеристик будинків.

Аналіз останніх досліджень. У контексті глобального сталого розвитку будівлі розглядаються як значне джерело споживання енергії, що підкреслює важливість застосування новаторських стратегій для покращення ефективності й зменшення негативного впливу на природне середовище. Дані дослідження аналізують великий потік необроблених даних про будівельну інфраструктуру з метою виявлення моделей енергоспоживання та розробки стратегій для оптимізації використання

ресурсів. Вони показують значний прогрес у використанні цифрових технологій, штучного інтелекту та комплексних підходів. Наприклад, штучні нейронні мережі для фізичного моделювання показують високу точність при розрахунках теплових втрат [1]. Комерційна програма AI BrainBox вказувала на фактичне зменшення енергоспоживання систем опалення і кондиціонування повітря на 15,8% [2]. Використання цифрових двійників на основі BIM дозволяють реалізовувати моделювання енергетичної поведінки у реальному часі [3].

Метою даної роботи є розгляд сучасних наукових підходів до оцінки енергоефективності будівель, включаючи математичне моделювання, застосування штучного інтелекту, методи аналізу ефективності, дистанційне зондування, а також інтеграція технологій BIM та аналіз життєвого циклу.

Матеріали та методи

Методи аналізу ефективності (DEA). Аналіз результативності використання енергетичних ресурсів у будівлях за допомогою методу аналізу зв'язку із виробництвом (DEA) дозволяє проводити порівняльний аналіз. Цей підхід базується на створенні «еталонної» межі ефективності та визначенні об'єктів, для яких є потенціал для покращення [4].

Це один з найпоширеніших способів нефінансового аналізу ефективності. Використовується для порівняння ефективності однорідних об'єктів (наприклад будинків або підприємств), якими використовуються різні ресурси для досягнення конкретних результатів.

У сфері енергоефективності будівель метод DEA дозволяє оцінити ефективність використання енергетичних ресурсів кожною будівлею для досягнення визначених цілей (наприклад: забезпечення комфортною температурою у приміщеннях і освітленням).

DEA - це математичний метод з нелінійною природою, який порівнюватиме об'єкти (у даному випадку будівлі), які мають схожі характеристики. Цей метод не вимагає попереднього визначення вагових коефіцієнтів для ресурсів та результатів; натомість використовуються дані самих об'єктів для створення меж ефективності.

Основні елементи DEA:

- вхідні дані включають в себе витрати на енергію (електроенергія, тепло), площу будівлі та кількість працівників або відвідувачів та інше;
- вихідні параметри це рівень комфорту, кількість наданих послуг, освітленість, температура повітря, CO₂-нейтральність тощо;
- межа ефективності - це "еталонна крива", яка встановлює найкращі об'єкти в дослідженні даного набору даних. Щоб оцінити свою

можливу покращену ефективність, інші об'єкти порівнюються з цим показником.

Енергетичне моделювання. Моделювання енергоспоживання в будівництві може бути проведене за допомогою програмних засобів типу EnergyPlus, DesignBuilder або IES VE для динамічного аналізу енергоефективності будівельних об'єктів. Ці моделі враховують параметри архітектурної геометрії споруди, використані матеріали і кліматичні умови [5].

Енергетичне моделювання включає в себе процес створення цифрової симуляції (моделі) будівлі з метою аналізу її енергоспоживання та ефективності функціонування інженерних систем. За допомогою спеціалізованого програмного забезпечення можна передбачати, як будівля реагуватиме на зміну кліматичних умов, навантажень, режимів експлуатації та інженерних рішень.

Метою енергетичного моделювання є оцінка кількості спожитої енергії для визначення ефективності систем опалення та кондиціонування повітря та оптимізація використання енергетичних ресурсів і створення моделей користувацьких сценаріїв поведінки.

Моделі беруть до уваги:

- архітектурне планування будівлі (кількість поверхів та приміщень, розташування вікон та орієнтація будинку по відношенню до сонця);
- властивості теплофізики будівельних матеріалів;
- зовнішні погодні умови (сонячна радіація, температура, вологість, вітер);
- аналіз поведінки користувачів включаючи графіки активності та використання освітлення та обладнання.

Машинне навчання та штучний інтелект охоплюють різноманітні алгоритми: від Random Forest та Lasso Regression до XGBoost та нейронних мереж. Ці методи ефективно передбачають витрати енергії на основі об'ємних даних та корисні для вивчення складних нелінійних зв'язків [6].

Вивчення факторів впливу на енергоефективність та зменшення витрат у будівлях можливо за допомогою моделей Lasso Regression, Decision Tree та Random Forest для точного передбачення використання енергії. Дослідження глибоко аналізує щодо чинників впливу на споживання енергії у будинках і фокусу на первинне паливо та електроенергію і потенціал для значних заощаджень коштів і переваг для довкілля. Це дослідження надасть цінну базу для зацікавлених сторін у галузях з метою впровадження більш чистих та сталих практик у сфері енергетики.

Дистанційне зондування та геоаналітика. Сучасні методи визначення енергоефективності будівель потребують фактичного виходу сертифікованих енергоаудиторів на майданчик - цей процес є повільним, дорогим і обмеженим географічно. Для швидкого визначення перспективних цілей модернізації можна оцінювати енергоефективність

будівель лише за доступною публічною інформацією щодо дистанційного зондування - зокрема за даними аерофотозйомки чи супутникових даних стосовно температури Землі (LST).

Прилади дистанційного зондування – такі як дані від супутників та аерофотозйомка – дозволяють оцінювати енергоефективність на рівні міста чи району без необхідності фактичного доступу до будинків [7].

Оцінка життя циклу (LCA). Цей аналіз є інструментом для визначення загального впливу продукту чи процесу на навколишнє довкілля. Він охоплює весь процес створення продукту - від джерел походження матеріалів до кінцевої утилізації.

Дослідження життєвого циклу продукту вимагає детального переліку ресурсів та матеріалів, що їх потребуватимуть на всіх етапах створення продукту або послуги і оцінки викидів у природне середовище.

Методологія LCA дозволяє оцінити енергоефективність будинку, враховуючи всі етапи його життя: від видобутку сировини до використання. Це допомагає отримати більш повне оцінювання з екологічною складовою [8, 9].

BIM-аналітика. Аналіз BIM (будівельне моделювання інформаційною моделлю) у поєднанні з енергетичними симуляторами дозволяє проводити моделювання енергетичної поведінки будинку ще на етапі проектування, сприяючи вибору оптимальних проектних рішень.

BIM - це не просто інструмент для підвищення енергоефективності; це комплексна система, що сприяє загальній стійкості будівельних проектів. Його здатність працювати з величезними обсягами інформації та інтегруватися з іншими технологіями робить його важливим активом у прагненні до більш екологічних підходів до будівництва. Повноцінне використання можливостей BIM дозволяє будівельному сектору досягти значних успіхів у зменшенні негативного впливу на навколишнє середовище та сприяти сталому майбутньому заощаджуючи електроенергію та моделюючи енергетичний режим за допомогою програм (EnergyPlus Open Studio) [10, 11].

Інтеграція Інтернету речей та аналізу великих даних. Використання пристроїв Інтернету речей для постійного збору даних про мікроклімат та споживання енергії, використання технологій великих даних для аналізу та передбачення енергоефективності [12, 13].

Використання комплексних критеріїв оцінки. Перехід від аналізу теплотехнічних показників до комплексного аналізу за багатьма факторами включаючи оцінку використання первинної енергії, вуглецевого сліду та життєвого циклу матеріалів [14, 15].

Орієнтованість на нульове чи позитивне використання енергії. Популяризація стандартів NZEB (практично нульових енергетичних будинків) та концепцій “позитивної енергії будинків”, де будівлі виробляють більше енергії ніж споживають [16, 17].

Аналіз теплового комфорту та адаптивності. Дослідження забезпечення комфорту від тепла та адаптивності будинків до змін кліматичних умов включають в себе оцінку рівня комфорту користувачів (PMV / PPD), а також аналіз пристосованості будинків до нових умов [18, 19].

Інноваційні методи енергоаудиту. Інноваційні підходи до енергоаудиту включають застосування безпілотних літальних апаратів (дронів) для тепловізійного обстеження, використання 3D-сканування та створення цифрових моделей будівель [20, 21].

Еволюція систем сертифікації. Еволюція процесу сертифікаційних систем привела до появи нових стандартів (WELL, EDGE, GRES B), які охоплюють аспекти сталого розвитку, енергоефективності та здоров'я користувачів [22–24].

Висновки

Підвищення енергоефективності в будівництві є багатогранним завданням, що вимагає інтеграції інноваційних технологій, новітніх матеріалів та наукових підходів. Використання штучного інтелекту, сучасних методів оцінки енергоефективності дозволяє створювати будівлі, які не лише зменшують споживання енергії, але й сприяють збереженню навколишнього середовища. Подальші дослідження та впровадження цих інновацій є ключовими для досягнення цілей сталого розвитку та енергетичної безпеки.

Сучасні наукові методи оцінки енергоефективності будівель дозволяють не лише проводити глибокий аналіз, а й оптимізувати процеси проєктування та експлуатації. У поєднанні із цифровими технологіями, ці підходи відкривають нові горизонти для сталого розвитку будівельної галузі.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

Література

1. Jiang Z., Wu L., Sun H., et al. Physics-Informed Neural Networks for Thermal Loss Estimation in Buildings. *arXiv preprint arXiv:2311.08035*. 2023. Available at: <https://arxiv.org/abs/2311.08035>
2. BrainBox AI. AI-Powered HVAC Efficiency Results [Electronic resource]. *Time Magazine*. 2024. Available at: <https://time.com/7201501/ai-buildings-energy-efficiency>
3. Neri R., Mastrolembo Ventura S., Arnone G. Digital Twins for Energy Optimization in BIM Environments. *arXiv preprint arXiv:2305.04498*. 2023. Available at: <https://arxiv.org/abs/2305.04498>
4. Charnes A., Cooper W. W., Rhodes E. Measuring the efficiency of decision-making units. *European Journal of Operational Research*, 1978. Vol. 2, No. 6. P. 429–444.
5. EnergyPlus Energy Simulation Software [Electronic resource]. *U.S. Department of Energy*. Access mode: <https://energyplus.net>
6. Ahmad T., Chen H. Machine learning-based building energy consumption prediction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019. Vol. 100. P. 127–134.
7. Weng Q. Remote Sensing of Impervious Surfaces. *Boca Raton: CRC Press*, 2012. 441 p.
8. Cabeza L. F., Rincón L., Vilariño V., Pérez G., Castell A. Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 29. P. 394–416.
9. Azhar S., Brown J., Farooqui R. BIM-based sustainability analysis: An evaluation of building performance analysis software. *Proceedings of the 45th ASC Annual Conference*. Gainesville, FL, 2009. P. 1–8.
10. Eastman, C. M., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2011). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling*. Wiley.
11. Crawley, D. B., Hand, J. W., Kummert, M., & Griffith, B. T. (2008). Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. *Building and Environment*, 43(4), 661–673.
12. Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7), 1645–1660.
13. Marjani, M., et al. (2017). Big IoT Data Analytics: Architecture, Opportunities, and Open Research Challenges. *IEEE Access*, 5, 5247–5261.
14. Cabeza, L. F., Rincón, L., Vilariño, V., Pérez, G., & Castell, A. (2014). Life Cycle Assessment (LCA) and Life Cycle Energy Analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 394–416.
15. ISO 14040:2006. Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework.
16. European Parliament. (2010). Directive 2010/31/EU on the Energy Performance of Buildings (recast).

17. Marszal, A. J., & Heiselberg, P. (2009). A literature review of Zero Energy Buildings (ZEB) definitions. *Applied Energy*, 89(2), 551–568.
18. Fanger, P. O. (1970). *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*. McGraw-Hill.
19. Nicol, F., & Humphreys, M. (2002). Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and Buildings*, 34(6), 563–572.
20. Sankaran, S., et al. (2019). Thermal Imaging Drones for Energy Auditing of Buildings. *Remote Sensing*, 11(8), 939.
21. Lu, Y., et al. (2020). Digital Twin-driven Smart Manufacturing: Connotation, Reference Model, Applications and Research Issues. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 61, 101837.
22. International WELL Building Institute. (2020). *The WELL Building Standard v2*.
23. International Finance Corporation (IFC). (2018). *EDGE: An Innovation of IFC — Green Buildings for Emerging Markets*.
24. GRESB. (2021). *GRESB Real Estate Assessment Reference Guide*.

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 06.05.2025	Received 06.05.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 23.05.2025	Received in revised form 23.05.2025
Прийнято	Accepted
Опубліковано	Published

N. V. Komenda*

PhD in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5944-8665>
 Department of Electrical Engineering
 Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

I. V. Hrytsiuk,

PhD in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4472-306X>
 Department of Electrical Engineering
 Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

V. I. Volynets

PhD in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9192-2785>
 Department of Electrical Engineering
 Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

A. V. Hadai

PhD in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4195-7218>
 Department of Electrical Engineering
 Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

D. T. Komenda

PhD student
 Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

*corresponding author, e-mail: nykomenda@gmail.com

Scientific approaches to assessing the energy efficiency of buildings

How to Cite:

Komenda, N. V., Hrytsiuk, I. V., Volynets, V. I., Hadai, A. V., Komenda, D.T. (2025). Scientific approaches to assessing the energy efficiency of buildings. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 23, 123-131. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-12](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-12)

Abstract. The research explores modern scientific methods for building energy efficiency assessment within present-day global sustainability frameworks. The growing need to decrease energy usage while improving indoor environmental quality makes advanced energy-saving technologies essential for adoption. The research examines new approaches to energy modeling and analysis by emphasizing mathematical modeling as an effective prediction tool for building energy performance. The method enables researchers to build precise physical models of thermal and energy processes, which allows them to include building-specific architectural features and climatic conditions, and operational parameters in complete energy assessments.

The main focus should be placed on artificial intelligence, together with its machine learning algorithms that operate within deep learning technologies and artificial neural networks. The system enables automatic processing of sensor and monitoring data, and remote sensing system data in large quantities. The new approach has resulted in better prediction accuracy and model adaptability to actual conditions. The research investigates contemporary methods for assessing energy efficiency through actual versus predicted consumption comparisons. The research investigates remote sensing of Earth's capabilities to detect heat losses and building defects and evaluate energy states through satellite or aerial photograph data analysis.

The research focuses on how Building Information Modeling technologies (BIM) combine with Life Cycle Assessment (LCA) methods to evaluate energy efficiency across all phases of building development, including conceptual stages, design, construction, operational use, and maintenance.

The research discusses potential advancements of these approaches in the digital transformation of the construction industry. The introduction of "smart" building management systems (Smart Building Systems) along with Internet of Things (IoT) integration and compliance with modern European and international standards for energy efficiency.

Keywords: energy efficiency, artificial intelligence, energy modeling, DEA, BIM, life cycle, LCA, remote sensing.

УДК 539.3

С. Л. Куцик*

асистент, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5330-5911>

Кафедра прикладної математики та механіки

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

О. А. Мікуліч

д.т.н., професор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4522-596X>

Кафедра прикладної математики та механіки

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

Д. А. Гусачук

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5899-1706>

Кафедра матеріалознавства

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

*автор-кореспондент, e-mail: sergiyk88@gmail.com

Вплив технічних умов виробництва на механічні властивості 3D друківаних полімерних елементів

Цитувати як:

Куцик С.Л., Мікуліч, О. А., Гусачук, Д.А., (2025). Вплив технічних умов виробництва на механічні властивості 3D друківаних полімерних елементів. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 23, 132-142. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-13](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-13)

© 2025, Куцик С.Л., Мікуліч, О. А., Гусачук, Д.А

Анотація. У даній статті представлено результати дослідження впливу виробника полімерної нитки на механічні характеристики зразків, виготовлених методом FDM (Fused Deposition Modeling) 3D-друку. Метою роботи було визначення залежності міцнісних властивостей надруківаних деталей від якості сировини різних виробників філаменту при використанні однакових параметрів друку. В експерименті використано чотири групи зразків одного типу і розміру, надруківані з філаменту від різних виробників на одній і тій самій 3D-принтерній установці з фіксованими технологічними параметрами.

Проведено механічні випробування на розтяг повздовжньою силою на універсальній випробувальній машині МІІ-40КУ з фіксацією показників напружено-деформівного стану зразка. З метою кількісної оцінки механічної міцності визначено межу пружності та текучості при розтягуванні, модуль Юнга, пружну та пластичну деформацію в зоні текучості. Отримані результати засвідчили істотну варіативність механічних властивостей залежно від постачальника філаменту, що зумовлено відмінностями у складі полімеру, ступені висушування, домішках та технології виготовлення філаменту.

Дослідження демонструє критичне значення вибору якісного матеріалу при проєктуванні та виготовленні відповідальних деталей методом FDM-друку. Отримані дані можуть бути використані користувачами 3D друку, для яких важливо в своїй роботі підібрати не лише необхідний вид філаменту, а й навіть

виробника продукт якого задовільнить його потреби при виготовленні відповідальних деталей. Отримані результати демонструють важливість попереднього тестування матеріалів перед їх використанням у відповідальних виробках. Крім того, графіки навантаження й деформації підтвердили аналітичні спостереження та дозволили глибше зрозуміти поведінку кожного типу зразків під впливом силових навантажень.

Ключові слова: 3D друк, філамент, технологія виготовлення, міцнісні характеристики.

Вступ

Упродовж останніх років технології 3D-друку набули стрімкого розвитку і сьогодні активно використовуються не лише в прототипуванні, а й у малосерійному виробництві деталей для медицини, авіації, машинобудування та побутових потреб. Одним із найпоширеніших матеріалів для друку є термопластики, які завдяки своїй доступності, простоті обробки та прийнятним механічним характеристикам стали основою для виготовлення широкого спектра виробів.

У процесі виробництва важливу роль відіграє не лише тип пластику, а й сам виробник матеріалу, оскільки якість сировини, домішки, параметри екструзії, контроль вологості та інші технологічні чинники безпосередньо впливають на механічні властивості кінцевого виробу. Часто користувачі 3D-принтерів, працюючи з одним і тим самим типом матеріалу (наприклад, PLA чи PETG), спостерігають суттєві відмінності в міцності залежно від бренду філамента. Саме це стало відправною точкою для нашого дослідження.

У даній роботі проведено порівняльний аналіз механічних характеристик одного й того ж виду пластику, надрукованого з однаковими параметрами, але від різних виробників. Для цього було побудовано графіки залежності напруження від деформації (σ – ϵ) і розраховано ключові показники, зокрема: модуль Юнга [1], межу пружності та текучості [2], пружну і пластичну деформацію [3].

Цей аналіз дає змогу виявити, наскільки дотримання виробником технічних умов при виготовленні пластику впливає на механічну поведінку матеріалу і дозволяє свідомо обирати філамент для задач, де потрібна точність, міцність або навпаки – еластичність.

Аналіз літературних досліджень та постановка проблеми

У контексті швидкого розвитку технологій адитивного виробництва, дедалі більше уваги приділяється вивченню механічних характеристик друкованих виробів. Різні дослідники відзначають, що на властивості надрукованих зразків впливають численні фактори – від параметрів друку (температура, швидкість, висота шару) до якості та складу філаменту [4], [5].

Авторами в попередніх дослідженнях [6] було помічено що, при однакових розмірах, параметрах друку зразків, виробника матеріалу, існує певна розрізненість результатів, що й змусило провести дане дослідження.

У роботах [7], [8] наголошується, що різні виробники одного й того ж типу пластику можуть мати варіації у вмісті домішок, чистоті сировини та ступені осушення пластика. Що безпосередньо впливає на міцність, пружність і міжшарову адгезію надрукованих зразків. В роботі [9] також наводиться аналіз фізико-механічних характеристик PLA-філаментів від кількох брендів, де різниця в модулі Юнга сягала 30%, навіть за однакових умов друку.

У статті [10] окремо розглядається вплив виробника філаменту на межу текучості, показуючи, що деякі зразки втрачають здатність витримувати навантаження в межах пружної деформації вже при 50% від максимального навантаження, тоді як інші демонструють стійкість до майже повного руйнування без втрати форми.

Таким чином, літературні джерела підтверджують, що дослідження залежності механічних властивостей від виробника пластику є актуальним і необхідним, особливо у випадках, коли кінцевий виріб має працювати в умовах навантажень. Аналіз напружено-деформованих діаграм дозволяє не лише об'єктивно порівняти матеріали, але й рекомендувати певні бренди для специфічних завдань.

Метою даної роботи є дослідження впливу вибору виробника на поведінку одного й того ж матеріалу в умовах навантаження стиску.

Методика експериментальних досліджень

У даній роботі досліджуються механічні характеристики чотирьох груп пластиків, кожен з яких виготовлений іншим виробником. Аналіз виконується на основі напружено-деформованих діаграм та розрахованих характеристик міцності.

Друк зразків проводився на 3D-принтері «Bambu Lab P1S» з такими параметрами друку: швидкість друку – 50 мм/с; щільність заповнення – 100%; висота шару – 0,08 мм, висота початкового шару – 0,2 мм. Випробування на стиск проводилось на дослідній машині МІ-40КУ при швидкості навантаження 1 мм/хв. Для вивчення впливу масштабних факторів дослідження проводилось для трьох груп зразків: 20×20×20 мм та однієї 10×10×10 мм. А саме: Виробник 1 [11]; Виробник 2 [12]; Виробник 3 [13]; Виробник 4 [14].

У зв'язку з тим, що зразок [14] мав удвічі менші лінійні розміри, для порівняння з рештою результатів було введено емпіричний коефіцієнт корекції $k=1.4$, що враховує вплив масштабу на точність, адгезію шарів та похибку деформації.

Експериментально виявлено, що існує суттєвий вплив масштабних факторів на механічну поведінку тіл при деформуванні: зменшені геометричні розміри вплинули на результати механічного випробування: отримано нижчі значення модуля Юнга, межі текучості та пружності цього зразка. Оцінка впливу масштабних факторів проводилася наступним чином. Оскільки зразок має вдвічі менші лінійні розміри, його площа та довжина в $4\times$ і $2\times$ разів менші відповідно. Це дає змогу оцінити приблизну похибку, спричинену розміром.

Результати та обговорення

У результаті проведених експериментальних випробувань на стиск було отримано напружено-деформаційні характеристики для чотирьох груп зразків від різних виробників. Хоча всі зразки були надруковані при однакових параметрах друку, результати продемонстрували суттєві відмінності в механічних властивостях, що вказує на те, яку важливу роль відіграє виробник матеріалу та особливості складу філаменту.

Отримані значення експериментальних досліджень співставлені та занесені до таблиці 1.

Таблиця 1. Отримані числові значення механічних характеристик

Виробник	Модуль Юнга, МПа	Пружна деформація, %	Пластична деформація в зоні текучості, %	Межа пружності, МПа	Межа текучості, МПа
Виробник 1	1445	7,5	21	69	74
Виробник 2	717	4,15	19	67,5	73
Виробник 3	1355	9,9	27,3	74	75
Виробник 4	867	8,1	25,5	59	75

Аналізуючи отримані результати, можна зробити ряд висновків щодо кожного зі зразків. Зразки Виробника 1 продемонстрували найвищу жорсткість: модуль Юнга становив 1445 МПа, що приблизно вдвічі більше, ніж у Виробника 2. Така висока жорсткість вказує на значну щільність і структурну однорідність матеріалу. Проте зразки цього виробника характеризувалися відносно невеликою пружною деформацією (7,5%) та обмеженою пластичністю (21%), що може свідчити про крихку поведінку матеріалу після перевищення межі пружності.

Зразок Виробника 2 виявився найм'якшим серед досліджуваних, з модулем Юнга лише 717 МПа, що на 47% менше, ніж у Виробника 3.

Пружна деформація становила 4,15%, а пластична – 19%. Така комбінація свідчить про те, що матеріал деформується під навантаженням більш плавно, проте менш здатний зберігати форму після вивантаження. Попри відносно низький модуль Юнга, межа текучості була близькою до інших зразків – 73 МПа, що може свідчити про використання присадок, які знижують жорсткість, але зберігають міцність.

Найбільш збалансовані характеристики були виявлені у зразках Виробника 3, що є найвищими значеннями серед усіх зразків. Ці зразки також мали найвищі деформаційні показники, що є на ~30% більше, ніж у Виробника 1. Це свідчить про підвищену енергопоглинальну здатність матеріалу та його адаптивність до навантаження без втрати цілісності. Такий полімер може бути рекомендований для функціональних деталей, що працюють під змінним навантаженням.

Зразки Виробника 4 мали зменшені геометричні розміри, тому їх результати аналізувалися з урахуванням масштабного коефіцієнта. Відповідно скориговані результати показали модуль Юнга 867 МПа, що є середнім значенням серед інших виробників. Проте ці зразки виявилися досить деформативними: пружна деформація становила 8,1%, пластична — 25,5%, що майже дорівнює значенням зразків Виробника 3. Межа текучості була такою ж високою, як і у кращих зразків. Таким чином, незважаючи на меншу жорсткість, зразки Виробника 4 проявили себе як механічно витривалі й здатні до значної навантаження без руйнування, що може бути результатом кращої адгезії між шарами або пластичних модифікаторів у складі філаменту.

Таким чином, можна стверджувати, що виробник філаменту має вирішальний вплив на механічні властивості зразків, навіть за однакових умов друку. Різниця в модулі Юнга між найжорсткішим і найм'якшим зразком склала понад 100%, що є критичним для технічних застосувань. Міцність усіх зразків є порівнюваною, однак деформаційна поведінка суттєво різниться. Це свідчить, що модифікації складу філаменту (наприклад, пластифікатори або інші добавки) можуть змінювати механічну відповідь, не змінюючи міцності.

Аналізуючи отримані результати можна зробити наступні практичні рекомендації щодо сфери їх застосування:

- зразки Виробника 3 мають найкращий баланс жорсткості та деформаційної здатності, що робить їх найперспективнішими для відповідальних деталей з умовами експлуатаційного навантаження;
- зразки Виробника 1 найбільш жорсткі, але схильні до крихкого руйнування, що обмежує їхнє використання в умовах ударних або циклічних навантажень;

– матеріали Виробника 2 та 4 можуть бути рекомендовані для гнучких або амортизуючих елементів, де допустима значна пластична деформація без втрати функціональності.

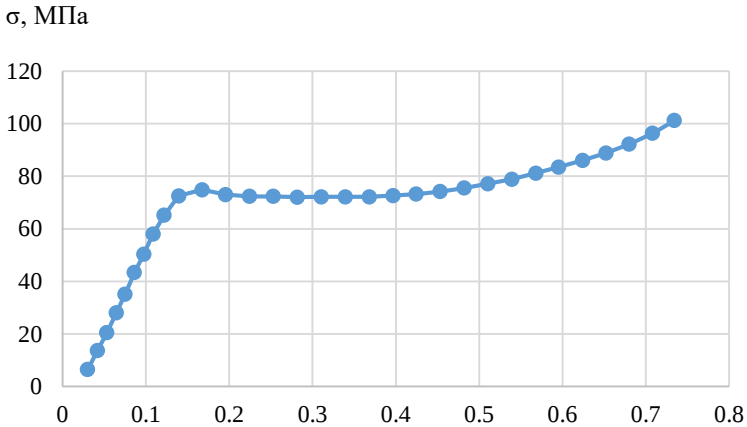


Рис. 1. Графік напружень для зразків Виробника 1 ϵ , мм

Для кращого розуміння поведінки зразків під навантаженням та підтвердження отриманих числових результатів, нижче наведено графіки залежності напруження від деформації для кожної групи матеріалів рисунок 1–4. Ці діаграми наочно демонструють особливості механічної поведінки: характерну жорсткість, межу пружності, текучість та здатність до пластичної деформації.

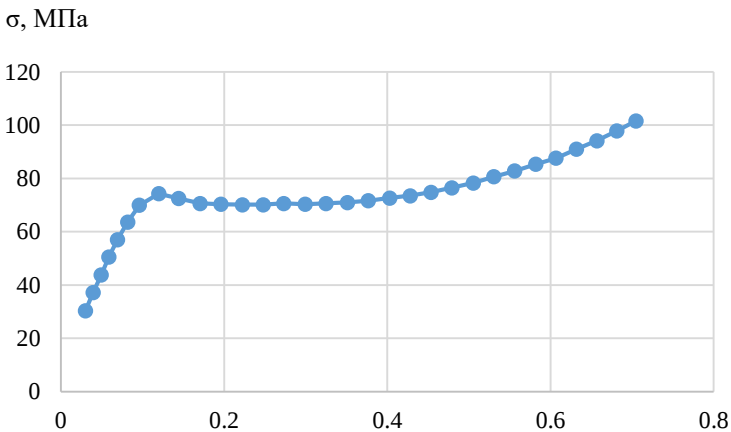


Рис. 2. Графік напружень для зразків Виробника 2 ϵ , мм

Графіки свідчать про чітко виражену межу пружності у Виробника 3, менш виражену — у Виробника 2. Це може бути корисним при розрахунках

σ , МПа

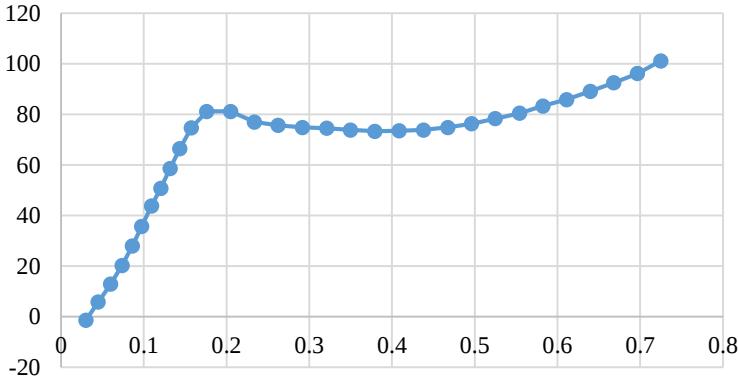


Рис. 3. Графік напружень для зразків Виробника 3
елементів, які працюють у пружному режимі.

σ , МПа

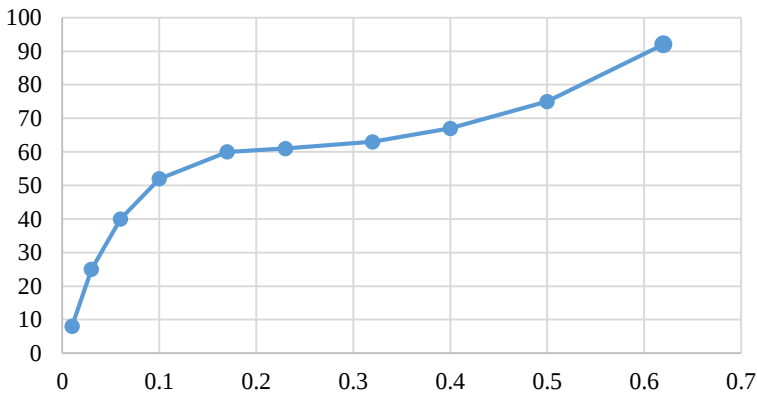


Рис. 4. Графік напружень для зразків Виробника 4
 ϵ , мм

Усі отримані графіки σ – ϵ мають характерні лінійні ділянки пружності, з подальшим переходом у зону текучості, що підтверджує достовірність випробувань. Робота наочно показує, що при виборі матеріалу

для критичних механічних задач важливо враховувати не лише тип пластику, але й виробника.

Висновки

Проведене дослідження підтвердило, що навіть за однакових умов 3D-друку механічні властивості матеріалів можуть істотно відрізнятися залежно від виробника. Такі відмінності проявляються у жорсткості, пружності та здатності до пластичної деформації зразків.

Деякі матеріали показали кращу міцність, інші – вищу гнучкість, що свідчить про необхідність ретельного вибору філаменту під конкретні технічні потреби. Наприклад, одні зразки виявилися більш придатними для статичних і жорстких деталей, інші – для виробів, які можуть деформуватися в роботі або витримувати динамічні навантаження.

Отримані результати демонструють важливість попереднього тестування матеріалів перед їх використанням у відповідальних виробках. Крім того, графіки навантаження й деформації підтвердили аналітичні спостереження та дозволили глибше зрозуміти поведінку кожного типу зразків під впливом силових навантажень.

Загалом, дослідження дає змогу сформулювати практичні рекомендації для інженерів і користувачів 3D-друку при виборі матеріалів залежно від функціонального призначення деталей.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. URL:https://en.wikipedia.org/wiki/Young%27s_modulus (дата звернення: 01.05.2025).
2. URL:[https://en.wikipedia.org/wiki/Yield_\(engineering\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Yield_(engineering)) (дата звернення: 01.05.2025).

3. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Deformation_\(engineering\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Deformation_(engineering)) (дата звернення: 01.05.2025).
4. Tymrak B. M., Kreiger M., Pearce J. M. “Mechanical properties of components fabricated with open-source 3D printers under realistic environmental conditions.” *Materials & Design*, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.038>
5. Torrado A. R., Roberson D. A., Wicker R. B. “Characterizing the effect of additives to ABS on the mechanical property anisotropy of specimens fabricated by material extrusion 3D printing.” *Additive Manufacturing*, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2015.02.001>
6. Kutsyk S., Mikulich O., Feshchuk Y. Experimental Study of Material Anisotropy Effect for 3D Printing Elements. *Materials Science Forum*, 1141, (2024) 63–72. <https://doi.org/10.4028/p-Xen66g>
7. Spoerk M., Holzer C., Gonzalez-Gutierrez J. “Material extrusion-based additive manufacturing of polypropylene: A review on challenges, improvements, and applications.” *Polymers*, 2020. <https://doi.org/10.1002/app.48545>
8. Goh G. D. et al. “Process–structure–properties in polymer additive manufacturing via material extrusion: A review.” *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2020. <https://doi.org/10.1080/10408436.2018.1549977>
9. Ziemian C. W., Sharma M., Ziemian S. “Anisotropic mechanical properties of ABS parts fabricated by fused deposition modelling.” *Mechanical Engineering*, 2012. <https://doi.org/10.5772/34233>
10. Torrado Perez A. R. et al. “Impact of material and process parameters on the mechanical properties of 3D printed parts.” *Rapid Prototyping Journal*, 2014. <https://doi.org/10.1108/RPJ-03-2013-0030>
11. URL: <https://lbi-corp.com/> (дата звернення: 01.05.2025).
12. URL: <https://monofilament.com.ua/ua/> (дата звернення: 01.05.2025).
13. URL: <https://shop.plexiwire.com.ua/> (дата звернення: 01.05.2025).
14. URL: <https://boze.com.ua/> (дата звернення: 01.05.2025).

Література

1. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Young%27s_modulus (дата звернення: 01.05.2025).
2. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Yield_\(engineering\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Yield_(engineering)) (дата звернення: 01.05.2025).
3. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Deformation_\(engineering\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Deformation_(engineering)) (дата звернення: 01.05.2025).
4. Tymrak B. M., Kreiger M., Pearce J. M. “Mechanical properties of components fabricated with open-source 3D printers under realistic environmental conditions.” *Materials & Design*, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.038>
5. Torrado A. R., Roberson D. A., Wicker R. B. “Characterizing the effect of additives to ABS on the mechanical property anisotropy of specimens fabricated by

material extrusion 3D printing.” *Additive Manufacturing*, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2015.02.001>

6. Kutsyk S., Mikulich O., Feshchuk Y. Experimental Study of Material Anisotropy Effect for 3D Printing Elements. *Materials Science Forum*, 1141, (2024) 63–72. <https://doi.org/10.4028/p-Xen66g>

7. Spoerk M., Holzer C., Gonzalez-Gutierrez J. “Material extrusion-based additive manufacturing of polypropylene: A review on challenges, improvements, and applications.” *Polymers*, 2020. <https://doi.org/10.1002/app.48545>

8. Goh G. D. et al. “Process–structure–properties in polymer additive manufacturing via material extrusion: A review.” *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2020. <https://doi.org/10.1080/10408436.2018.1549977>

9. Ziemian C. W., Sharma M., Ziemian S. “Anisotropic mechanical properties of ABS parts fabricated by fused deposition modelling.” *Mechanical Engineering*, 2012. <https://doi.org/10.5772/34233>

10. Torrado Perez A. R. et al. “Impact of material and process parameters on the mechanical properties of 3D printed parts.” *Rapid Prototyping Journal*, 2014. <https://doi.org/10.1108/RPJ-03-2013-0030>

11. URL: <https://lbl-corp.com/> (дата звернення: 01.05.2025).

12. URL: <https://monofilament.com.ua/ua/> (дата звернення: 01.05.2025).

13. URL: <https://shop.plexiwire.com.ua/> (дата звернення: 01.05.2025).

14. URL: <https://boze.com.ua/> (дата звернення: 01.05.2025).

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 19.05.2025	Received 19.05.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 23.05.2025	Received in revised form 23.05.2025
Прийнято 01.06.2025	Accepted 01.06.2025
Опубліковано 25.06.2025	Published 25.06.2025

S. L. Kutsyk*

assistant, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5330-5911>

Department of Applied Mathematics and Mechanics

Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

O. A. Mikulich

D.Sc. in Engineering, Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4522-596X>

Department of Applied Mathematics and Mechanics

Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

D. A. Husachuk

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5899-1706>

Department of Materials Science

Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

*corresponding author, e-mail: sergiyk88@gmail.com

Influence of production specifications on the mechanical properties of 3D printed polymer elements

How to Cite:

Kutsyk S. L., Mikulich, O. A., Husachuk, D. A., (2025). Influence of production specifications on the mechanical properties of 3D printed polymer elements. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 23, 132-142. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-13](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-13).

Abstract. This article presents the results of a study of the polymer filament manufacturer's influence on the mechanical characteristics of samples manufactured by the FDM (Fused Deposition Modeling) 3D printing method. The work aimed to determine the dependence of the strength properties of printed parts on the quality of raw materials from different filament manufacturers when using the same printing parameters. The experiment used four groups of samples of the same type and size, printed from filament from various manufacturers, on the same 3D printing installation with fixed technological parameters.

Mechanical tensile tests with longitudinal force were carried out on the universal testing machine MI-40KU with recording of the stress-strain state of the sample. To quantify the mechanical strength, the tensile elasticity and yield strength, Young's modulus, and elastic and plastic deformation in the yield zone were determined. The results obtained showed a significant variation in mechanical properties depending on the filament supplier, which is due to differences in polymer composition, degree of drying, impurities, and filament manufacturing technology.

The study demonstrates the critical importance of choosing high-quality material when designing and manufacturing critical parts using FDM printing. The data obtained can be used by 3D printing users, for whom it is important to choose not only the right type of filament, but also a manufacturer whose product will satisfy their needs in the manufacture of critical parts. The results demonstrate the importance of preliminary testing of materials before they are used in critical products. In addition, the load and strain graphs confirmed the analytical observations and provided a deeper understanding of the behavior of each type of sample under force loading.

Keywords: 3D printing, filament, manufacturing technology, strength characteristics.

А. С. Лапченко*

к.т.н., старший науковий співробітник, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4037-5395>

Кафедра мостів, тунелів та гідротехнічних споруд

Національний транспортний університет, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, Київ, Україна, 02000

*автор-кореспондент, email: las83@ukr.net

Вплив меленого доменного шлаку та пластифікуючої добавки на міцнісні властивості дорожнього бетону

Цитувати як:

Лапченко, А. С. (2025). Вплив меленого доменного шлаку та пластифікуючої добавки на міцнісні властивості дорожнього бетону. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 23, 143-154. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-14](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-14)

© 2025, Лапченко А.С..

Анотація. У статті наведено результати впливу різних дозувань поліакрилатного суперпластифікатора Dynaton SP 1 останнього покоління в широкому діапазоні концентрацій на міцнісні властивості дорожнього цементобетону на основі портландцементу з частковою заміною меленим доменним шлаком. Для порівняння міцнісних властивостей також досліджено цементобетон на основі портландцементу без заміни меленим доменним шлаком і з додаванням поліакрилатного суперпластифікатора Dynaton SP 1 в такому ж діапазоні. Проведено аналіз експериментальних досліджень зміни міцностей при стиску та розтязі при згині будівельного розчину на основі портландцементу з частковою його заміною молотим доменним шлаком в діапазоні від 0 % до 20 %. Зроблено висновок про те, що заміна портландцементу в кількості 10-14 % молотим доменним шлаком є цілком прийнятною, що обумовлено помірним зниженням міцнісних показників. Встановлено концентрацію акрилового суперпластифікатора Dynaton SP 1, яка відповідає максимуму міцностей при стиску та розтязі при згині цементобетону на основі портландцементу без часткової заміни молотим доменним шлаком. Така концентрація становить 1 % для міцності при стиску та 1,25 % для міцності розтягу при згині. Також визначено концентрації суперпластифікатора Dynaton SP 1 які забезпечують максимальні міцності при стиску та розтязі при згині цементобетону на основі портландцементу з частковою заміною його молотим доменним шлаком. Виявилось, що сама величина максимуму з використанням портландцементу з частковою заміною молотим доменним шлаком дещо менша, у порівнянні з максимумами при використанні портландцементу без часткової заміни молотим доменним шлаком: для міцності при стиску на 3-10 % та для міцності розтягу при згині на 6-9 %, залежно від кількості в'язучого. Також встановлено, що дещо відмінною є концентрація суперпластифікатора, яка відповідає максимуму міцності розтягу при згині цементобетону на основі часткової заміни

портландцементу у порівнянні з цементобетоном на основі портландцементу без часткової заміни. Величина цієї концентрації складає 1,1 %.

Ключові слова: акриловий суперпластифікатор, згин, концентрація, міцність, молотий доменний шлак, стиск, цементобетон.

Вступ

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Понад 80 % сучасного бетону з поліпшеними або удосконаленими властивостями містить різні види добавок або інших домішок [1-3]. Серед найпоширеніших добавок в свіжому цементобетоні – це водоредуруючі та пластифікуючі добавки (суперпластифікатори), а також багатофункціональні добавки [2, 4-10]. В даний час, відповідно до здатності зменшувати водо-цементне відношення водоредууючі добавки поділяються [1, 2, 7, 8, 11]: на звичайні, представлені лігносульфонатом; високої дії, представлені нафталіном, аліфатичними рядами тощо; і високоефективні, представлені поліакрилатами і полікарбоксилатами.

Крім пластифікуючих або водоредууючих добавок для зменшення вартості цементу, а відповідно і цементобетону на його основі дуже часто вводять добавки меленого доменного шлаку, як правило з безпосереднім додаванням в цемент [7, 12-14]. Мелений доменний шлак є побічним продуктом виробництва чавуну і складається з SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO тощо [7, 12, 13], що понад півстоліття активно використовується в технології цементу. Наявний склад перелічених оксидів спонукає до сульфатно-лужної реакції забезпечуючи гідравлічні властивості обумовлені скловидною структурою [7, 12]. Збільшення питомої поверхні шлаку активізує процеси гідратації за рахунок залучення поверхневих шарів частинок шлаку, що впливає на подальші властивості бетону [7, 12, 14]. Крім зміни властивостей бетону додавання до портландцементу молотого доменного шлаку впливає на економічну складову цементу, зменшуючи частку клінкеру і здешевлюючи остаточний продукт [12-14].

На сьогоднішній день відомі окремі дослідження властивостей дорожнього цементобетону, в яких поєднано ефект застосування добавок пластифікуючо-водоредууючої дії з використанням молотого доменного шлаку або часткової заміни ним портландцементу [7, 12, 13]. Дотого ж в цих наукових працях не застосовувався поліакрилатний суперпластифікатор.

Мета і завдання дослідження полягали у встановленні впливу різних дозувань поліакрилатного суперпластифікатору останнього покоління та меленого доменного шлаку при частковій заміні ним портландцементу на міцнісні властивості дорожнього цементобетону.

Матеріали та методи

У роботі використано портландцемент ПЦ І-500 ПрАТ “Дікергофф Цемент Україна”. В якості заповнювачів використано щебінь гранітний фр. 5-10 і 10-20, а також пісок кварцовий з модулем крупності 1,4. Також було використано доменний гранульований шлак ПАО “АрселорМіттал Кривий Ріг”. В якості суперпластифікуючої добавки використовували Dynamon SP 1. Dynamon SP 1 – добавка на основі модифікованих акрилових полімерів з покращеними властивостями водозниження і підвищеною ранньою міцністю в порівнянні з традиційними суперпластифікаторами, а також акриловими добавками першого покоління. Фізико-механічні випробування цементів, розчинів та бетонів проводили згідно з чинними стандартами. Міцнісні властивості цементних розчинів та цементобетонів оцінювали за міцнісним параметром, який визначався відношенням відповідної міцності при стиску чи розтягу при згині на 28 добу до максимально можливої відповідної міцності на 28 добу серед випробуваної партії зразків. Досліджувані цементобетони отримували з бетонних сумішей різних складів, як з додаванням молотого доменного шлаку та суперпластифікатору Dynamon SP 1, так і без них.

Суперпластифікатор Dynamon SP 1 вводили у кількості 0,5 %; 1,0 %; 1,5 %; 2,0 %; 2,5 %, а мелений доменний шлак – 5 %; 10 %; 15 % і 20 %. Обидві добавки вводились від маси портландцементу. Кількість портландцементу (в’язучого) змінювалась від 375 до 400 кг/м³.

Результати та обговорення

Вплив різних дозувань суперпластифікатору Dynamon SP 1 на міцність цементобетону. Результати показали (рис. 1 та рис. 2), що додавання нижчих доз суперпластифікатору Dynamon SP 1 ефективно покращило 28-денну міцність цементобетону при стиску і розтязі при згині. Для 28-денної міцності бетону при стиску ці нижчі дози суперпластифікатору Dynamon SP 1 були меншими за 1,0%. Для міцності цементобетону на розтяг при згині ці нижчі дози суперпластифікатору Dynamon SP 1 були меншими за 1,25%. Потім, коли доза суперпластифікатору Dynamon SP 1 була більшою, ніж зазначена вище відповідна доза, як міцність цементобетону при стиску, так і на розтяг при згині зменшувалась. Таким чином, відповідно до рис. 1 та рис. 2 видно, що цементобетон з додаванням 1,0% суперпластифікатора Dynamon SP 1 мав максимальне збільшення міцності при стиску, тоді як для міцності на розтяг при згині 1,25% суперпластифікатора Dynamon SP 1 призвело до максимального збільшення.



Рис. 1. Залежність зміни міцнісного параметру цементобетону при стиску від кількості введеного суперпластифікатора та кількості портландцементу ПЦ I-500: □ – 375 кг/м³; ◇ – 400 кг/м³

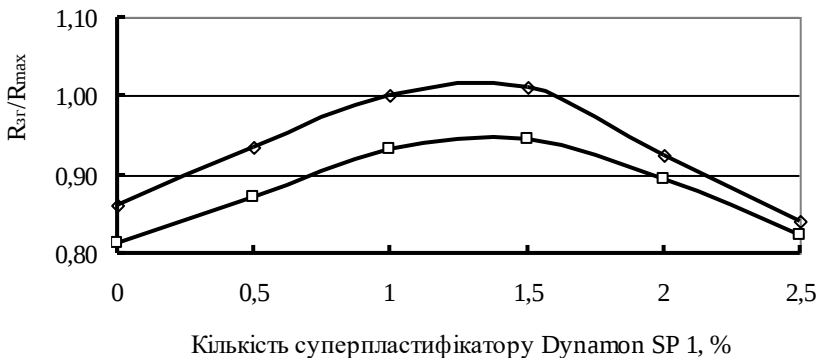


Рис. 2. Залежність зміни міцнісного параметру цементобетону при згині від кількості введеного суперпластифікатора та кількості портландцементу ПЦ I-500: □ – 375 кг/м³; ◇ – 400 кг/м³

Вплив портландцементу з додаванням молотого доменного шлаку на міцнісні показники. З метою дослідження впливу часткової заміни портландцементу в складі цементобетону молотим доменним шлаком першочергово потрібно було визначитись з величиною тонкості помолу доменного шлаку. На основі аналізу проведених досліджень в роботі [14] було зроблено висновок про недоцільність збільшення питомої поверхні молотого доменного шлаку більш ніж 370 м²/кг саме ПАО “АрселорМіттал Кривий Ріг”. Тому подальші дослідження виконували з використанням

молотого доменного шлаку питома поверхня якого наближалась до граничного обговореного значення і становила 358 м²/кг. Порівняльний аналіз впливу заміни портландцементу різною кількістю молотого доменного шлаку, що проводився на цементних розчинах з співвідношенням в'язучого до піску 1:3, констатував стабільність значень міцностей при стиску до 10 % заміни і незначного зниження міцності в межах 3 % при збільшенні заміни до 20 % (рис. 3). Заміна портландцементу молотим доменним шлаком сприяла постійному зменшенню міцності при згині цементних розчинів (рис. 4), що сприяло максимальному зниженню в 8 % при максимальній концентрації такої заміни.

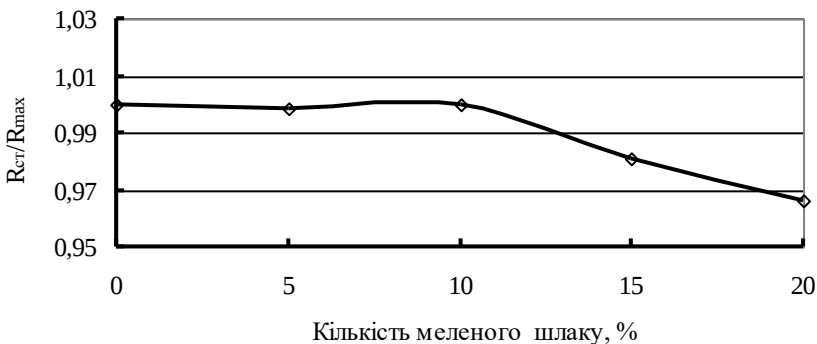


Рис. 3. Залежність зміни міцнісного параметру при стиску цементного розчину від кількості заміненого портландцементу меленим доменним шлаком

Для порівняння проводили випробування заводського портландцементу ПЦ ІІ/А-Ш 500. Міцнісні показники при стиску та розтязі при згині заводського портландцементу з додаванням молотих шлаків були співставні з 14% концентрацією штучної заміни портландцементу молотим доменним шлаком.

Отримані експериментальні результати, дозволяють констатувати, що заміна портландцементу в кількості 10-14% молотим доменним шлаком є цілком прийнятною, що обумовлено помірним зниженням міцнісних показників. Подальша перевірка зміни міцнісних властивостей цементобетону з додаванням різних концентрацій суперпластифікатору та портландцементу з частковою заміною молотим доменним шлаком буде проводитись на заводському цементі ПЦ ІІ/А-Ш 500, що відповідає прийнятній отриманій заміні в 14%.



Рис. 4. Залежність зміни міцнісного параметру при згині цементного розчину від кількості заміненого портландцементу меленим доменним шлаком

Міцність цементобетону на основі портландцементу з частковою заміною молотим доменним шлаком та різним дозуванням суперпластифікатора Dynamon SP 1. Дуже часто сумісність або несумісність цементу та різних домішок і добавок може мати непередбачуваний вплив на гідратацію цементу. Для тієї самої добавки суперпластифікатора та однакової марки цементу цей ефект може змінюватися, якщо будуть присутні різні домішки або фігуруватиме інший вид цементу чи тип бетону [15, 16]. Тому необхідно з'ясувати вплив різних дозувань акрилового пластифікатора на міцності цементобетону з використанням портландцементу, частково заміненого молотим доменним шлаком.

Як видно з рис. 5 та рис. 6 на міцності при стиску та розтязі при згині цементобетону з вирощанням портландцементу частково заміненого молотим шлаком (ПЦ II/A-III 500) також вплинули різні дози суперпластифікатора Dynamon SP 1.

Результати випробувань показали, що міцності при стиску та розтязі при згині цього виду цементобетону залежно від концентрації суперпластифікатора Dynamon SP 1 в діапазоні 0-2,5% мають екстремальний характер, аналогічно бетону на основі портландцементу без часткової його заміни молотим доменним шлаком. Хоча сама величина максимуму з використанням портландцементу з частковою заміною молотим доменним шлаком дещо менша: для міцності при стиску на 3-10% та для міцності розтягу при згині на 6-9%, залежно від кількості в'язучого.



Рис. 5. Залежність зміни міцнісного параметру цементобетону при стиску від кількості введеного суперпластифікатора та кількості портландцементу з додаванням меленого шлаку (ПЦ ІІ/А-ІІІ 500): □ – 375 кг/м³; ◇ – 400 кг/м³

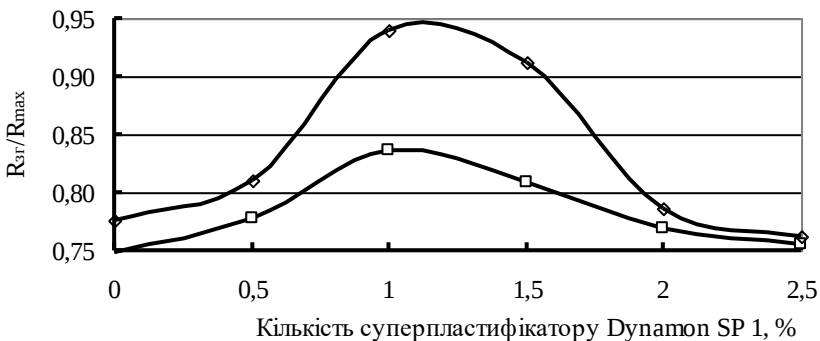


Рис. 6. Залежність зміни міцнісного параметру цементобетону при згині від кількості введеного суперпластифікатора та кількості портландцементу з додаванням меленого шлаку (ПЦ ІІ/А-ІІІ 500): □ – 375 кг/м³; ◇ – 400 кг/м³

Також дещо відмінною є концентрація суперпластифікатора, що відповідає максимуму міцності розтягу при згині цементобетону на основі часткової заміни портландцементу у порівнянні з цементобетоном на основі портландцементу без часткової заміни. Її величина складає 1,1%. Перевищення концентрацій суперпластифікатора що відповідають максимуму міцностей для бетону на основі портландцементу з частковою заміною мають більш високий темп зниження міцності ніж цементобетони на портландцементі без часткової заміни. Це може бути пов'язано з тим, що

сповільнений процес гідратації є результатом використання суперпластифікаторів у високій дозі [17].

Висновки

Розглянуто вплив акрилового суперпластифікатору Dynapom SP 1 в широкому діапазоні концентрацій на міцнісні властивості дорожнього цементобетону на основі портландцементів з частковою заміною його молотим доменним шлаком та без такої заміни. Показана можливість часткової заміни портландцементу молотим доменним шлаком в кількості до 14 % з помірним зниженням міцностей при стиску та розтязі при згині бетонів на його основі. Визначено концентрації суперпластифікатору Dynapom SP 1 які забезпечують максимальні міцності при стиску та розтязі при згині цементобетону на основі портландцементу з частковою заміною його молотим доменним шлаком.

Конфлікти інтересів

Автор заявляє, що у нього немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автор підтверджує, що при створенні поточної роботи він не використовував технології штучного інтелекту.

References

1. Plank, J., & Ilg, M. (2019). The role of chemical admixtures in the formulation of modern advanced concrete. In W. Boshoff, R. Combrinck, V. Mechtcherine, & M. Wyrzykowski (Eds.), 3rd International Conference on the Application of Superabsorbent Polymers (SAP) and Other New Admixtures Towards Smart Concrete. SAP 2019. RILEM Bookseries (Vol. 24, pp. 143–157). Springer, Cham.https://doi.org/10.1007/978-3-030-33342-3_16
2. Dvorkin, L. The main properties of cement concrete. Palmarium Academic Publishing, 2019. 232 p. ISBN-10: 6202383763, ISBN-13: 978-6202383769
3. Advantages of cement concrete roads in Ukraine. Economic assessment. URL: <http://www.ukrcement.com.ua/zakhodi/icalrepeat.detail/2017/11/14/48/-/kruhlyvist-na-temu-betonni-dorohy-realist-dlia-ukrainy-pid-holovuvanniam->

pershohozastupnyka-holovy-komitetu-z-pytan-transportu-vasiunika-iv-zauch.html?published_fv=-1

4. Onyshchenko, A. M., Chyzhenko, N. P. (2020). Assessment of the durability of cement concrete pavement of highways. Roads and Bridges, 22, 138-148. <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.22.138>

5. Gamelyak, I. P., Shurgaya, A. G., Yakymenko, Ya. M., Chyzhenko, N. P., et al. (2014). Comparison of modern additives for high-strength road concrete. Highways and Road Construction, 22, 38-49. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/92/UKR.htm

6. Tolmachov, S. M. (2013). Construction of roads with cement concrete pavement in Ukraine – the reality of today. Avtoshlyakhovyk Ukrainy, 4, 36-40. ISSN 0365-8392 (print)

7. Dvorkin, L. Y., Gots, V. I., Dvorkin, O. L. Testing concrete and mortars. Designing their compositions: a textbook. – K.: Osnova, 2014. – 304 p. ISBN: 978-966-699-772-5

8. Concrete road and airfield surfaces: a textbook / S. Y., Solodkyi, S. M., Tolmachov. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2016. – 132 p. ISBN: 978-966-941-030-6

9. Shevchuk, G. Ya., Gensetskyi, M. P., Hnyp, O. P., Raetska, K. O. (2015). Modified cement concretes for road and airfield surfaces. Bulletin of ODABA, 57, 461–464. ISSN: 2415-377X

10. Sanytskyi, M. A., Poznyak, O. R., Marushchak, U. D., Chemerys, M. M. et al. (2006). New generation modifiers for concrete. Building materials and products, 2006, 1, 5–7. ISSN 2413-9890 (Print)

11. Admixtures for concrete and mortar. Part 2. Admixtures for concrete. Definition, requirements, conformity, marking and labelling: DSTU EN 934-2:2019 (EN 934-2:2009+A1:2012, IDT), – [Valid from 2025-02-01], – Kyiv: State Enterprise “UkrNDNTS”, 2024. – 31 p. – (National Standard of Ukraine).

12. Raut, S. R., Saklecha, P. P., & Kedar, R. S. (2015). Review on ground granulated blast-furnace slag as a supplementary cementitious material. International Journal of Computer Applications, 975, Article 8887. ISSN 0975-8887

13. Özbay, E., Erdemir, M., & Durmuş, H. İ. (2016). Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties – A review. Construction and Building Materials, 105, 423–434. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.153>

14. Sobol, Kh. S., Markiv, T. Ye., Petrovska, N. I., Gidey, V. V. Analysis of the efficiency of using finely ground granulated blast furnace slag in concrete. Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic" Series: Theory and Practice of Construction, 2019, 912, 169-174. ISSN: 0321-0499

15. John, V. M., Quattrone, M., & Abrao, PCRA (2019). Rethinking cement standards: Opportunities for a better future. Cement and Concrete Research, 124, Article 105832. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105832>

16. Marchon, D., & Flatt, R. J. (2016). Impact of chemical admixtures on cement hydration. In P.-C. Aïtcin, & RJ Flatt (Eds.), Science and technology of concrete admixtures (pp. 279–304). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.016/B978-0-08-100693-1.00012-6>
17. Fujii, A. L., dos Reis Torres, D., de Oliveira Romano, R. C., Cincotto, M. A., & Pileggi, RG (2015) Impact of superplasticizer on the hardening of slag Portland cement blended with red mud. Construction and Building Materials, 101, 432–439. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.057>

Література

1. Plank, J., & Ilg, M. (2019). The role of chemical admixtures in the formulation of modern advanced concrete. In W. Boshoff, R. Combrinck, V. Mechtcherine, & M. Wyrzykowski (Eds.), 3rd International Conference on the Application of Superabsorbent Polymers (SAP) and Other New Admixtures Towards Smart Concrete. SAP 2019. RILEM Bookseries (Vol. 24, pp. 143–157). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-33342-3_16
2. Dvorkin, L. The main properties of cement concrete. Palmarium Academic Publishing, 2019. 232 p. ISBN-10: 6202383763, ISBN-13: 978-6202383769
3. Переваги цементобетонних доріг в Україні. Економічна оцінка. URL: <http://www.ukrcement.com.ua/zakhodi/icalrepeat.detail/2017/11/14/48/-/kruhlyistil-na-temu-betonni-dorohy-realnist-dlia-ukrainy-pid-holovuvanniam-pershohozastupnyka-holovy-komitetu-z-pytan-transportu-vasiunyka-iv-zauch.html?published fv=-1>
4. Онищенко, А. М., Чиженко, Н. П. (2020). Оцінка довговічності цементобетонного покриття автомобільних доріг. *Дороги і мости*, 22, 138-148. <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.22.138>
5. Гамеляк, І. П., Шургая, А. Г., Якименко, Я. М., Чиженко, Н. П., та ін. (2014). Порівняння сучасних добавок для високоміцного дорожнього бетону. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*, 22, 38-49. <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.22.063>
6. Толмачов, С. М. (2013). Будівництво автодоріг із цементобетонним покриттям в Україні – реальність сьогодення. *Автошляховик України*, 4, 36-40. ISSN 0365-8392 (друк)
7. Дворкін, Л. Й., Гоц, В. І., Дворкін, О. Л. Випробування бетонів і будівельних розчинів. Проектування їх складів: навчальний посібник. – К.: Основа, 2014. – 304 с. ISBN: 978-966-699-772-5
8. Бетонні дорожні та аеродромні покриття: навч. посібник / С. Й., Солодкий, С. М., Толмачов. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2016. – 132 с. ISBN: 978-966-941-030-6
9. Шевчук, Г. Я., Генсецький, М. П., Гнип, О. П., Раєцька, К. О. (2015). Модифіковані цементобетони для дорожніх та аеродромних покриттів. *Вісник ОДАБА*, 57, 461–464. ISSN: 2415-377X

10. Саницький, М. А., Позняк, О. Р., Марущак, У. Д., Чемерис, М. М. та ін. (2006). Модифікатори нової генерації для бетонів. *Будівельні матеріали та вироби*, 2006, 1, 5–7. ISSN 2413-9890 (Print)
11. Добавки для бетонів і будівельних розчинів. Частина 2. Добавки для бетонів. Визначення, вимоги, відповідність, маркування та етикетування: ДСТУ EN 934-2:2019 (EN 934-2:2009+A1:2012, IDT), – [Чинний від 2025-02-01], – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2024. – 31 с. – (Національний стандарт України).
12. Raut, S. R., Saklecha, P. P., & Kedar, R. S. (2015). Review on ground granulated blast-furnace slag as a supplementary cementitious material. *International Journal of Computer Applications*, 975, Article 8887. ISSN 0975-8887
13. Özbay, E., Erdemir, M., & Durmuş, H. İ. (2016). Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties – A review. *Construction and Building Materials*, 105, 423–434. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.153>
14. Соболев, Х. С., Марків, Т. Є., Петровська, Н. І., Гідей, В. В. Аналіз ефективності використання тонкомеленого доменного гранульованого шлаку в бетоні. Вісник Національного університету «Львівська політехніка» Серія: теорія і практика будівництва, 2019, 912, 169-174. ISSN: 0321-0499
15. John, V. M., Quattrone, M., & Abrao, P. C. R. A. (2019). Rethinking cement standards: Opportunities for a better future. *Cement and Concrete Research*, 124, Article 105832. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105832>
16. Marchon, D., & Flatt, R. J. (2016). Impact of chemical admixtures on cement hydration. In P.-C. Aitcin, & R. J. Flatt (Eds.), *Science and technology of concrete admixtures* (pp. 279–304). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00012-6>
17. Fujii, A. L., dos Reis Torres, D., de Oliveira Romano, R. C., Cincotto, M. A., & Pileggi, R. G. (2015) Impact of superplasticizer on the hardening of slag Portland cement blended with red mud. *Construction and Building Materials*, 101, 432–439. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.057>

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 14.05.2025	Received 14.05.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 23.05.2025	Received in revised form 23.05.2025
Прийнято 01.06.2025	Accepted 01.06.2025
Опубліковано 25.06.2025	Published 25.06.2025

A. S. Lapchenko*

Ph.D. in Engineering, Senior Researcher, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4037-5395>
 Department of Bridges, Tunnels, and Hydraulic Structures
 National Transport University, St. M. Omelyanovicha-Pavlenko, 1, Kyiv, Ukraine, 02000

*corresponding author, e-mail: las83@ukr.net

The influence of ground blast furnace slag and plasticizing additive on the strength properties of road concrete

How to Cite:

Lapchenko, A. S. (2025). The influence of ground blast furnace slag and plasticizing additive on the strength properties of road concrete. Modern technologies and calculation methods in construction, 23, 143-154. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-14](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-14)

Abstract. The article presents results of the latest generation of different dosages of polyacrylate superplasticizer Dynamon SP 1 in a wide concentration range influences the strength properties of road concrete based on Portland cement with partial replacement with ground blast furnace slag. To compare the strength properties, concrete based on Portland cement without replacement with ground blast furnace slag and with the addition of polyacrylate superplasticizer Dynamon SP 1 in the same range was also studied. Experimental studies of the change in compressive and flexural tensile strengths of a Portland cement-based mortar with its partial replacement with ground blast furnace slag in the range from 0% to 20% were conducted. It was concluded that the Portland cement replacement in an amount of 10-14 % with ground blast furnace slag is quite acceptable, which is due to a moderate decrease in strength indicators. The concentration of the acrylic superplasticizer Dynamon SP 1 was determined, which corresponds to the maximum compressive and flexural tensile strengths of cementconcrete based on Portland cement without partial replacement with ground blast furnace slag. This concentration is 1 % for compressive strength and 1,25 % for flexural tensile strengths. The concentrations of the superplasticizer Dynamon SP 1 were also determined, which provide the maximum compressive and flexural tensile strengths of concrete based on Portland cement with partial replacement with ground blast furnace slag. It turned out that the maximum value itself with the use of Portland cement with partial replacement with ground blast furnace slag is somewhat smaller, compared to the maximums when using Portland cement without partial replacement with ground blast furnace slag: for compressive strength by 3-10% and flexural tensile strengths by 6-9%, depending on the amount of binder. It was also found that the superplasticizer concentration corresponding to the maximum flexural tensile strength of concrete based on Portland cement with partial replacement, compared to concrete based on Portland cement without partial replacement, is somewhat different. The value of this concentration is 1,1 %.

Keywords: acrylic superplasticizer, bending, concentration, strength, ground blast furnace slag, compression, cement concrete.

УДК 624.011

Д. В. Михайловський

д.т.н., професор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3151-8630>

Кафедра металевих і дерев'яних конструкцій

Київський національний університет будівництва та архітектури, проспект Повітряних Сил,
31, Київ, Україна, 03037

М. А. Комар

доктор філософії, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3631-8999>

молодший науковий співробітник

ДП ДНТЦ ЯРБ

П. С. Гомон*

докторант, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5312-0351>

Кафедра металевих і дерев'яних конструкцій

Київський національний університет будівництва та архітектури, проспект Повітряних Сил,
31, Київ, Україна, 03037

*автор-кореспондент, e-mail: p.s.homon@nuwm.edu.ua

Чисельне моделювання деформування армованих дерев'яних балок з цільної та клеєної деревини

Цитувати як:

Михайловський, Д. В., Комар, М. А., Гомон, П. С. (2025). Чисельне моделювання деформування армованих дерев'яних балок з цільної та клеєної деревини. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 23, 155-170. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-15](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-15)

© 2025, Д. В. Михайловський, М. А. Комар, П. С. Гомон.

Анотація. У статті розглядаються результати чисельного моделювання деформування дерев'яних балок з клеєної та цільної деревини, виконаного за допомогою програмного комплексу ЛПРА-САПР 2024 R2.3, що використовує метод скінчених елементів (МСЕ). Визначено можливість застосування цього програмного комплексу для проектування армованих конструкцій з деревини, що є актуальним питанням для реконструкції та підсилення будівельних елементів. Моделювання дозволяє детально аналізувати напружено-деформований стан конструкцій, прогнозувати їх поведінку під навантаженням, а також порівнювати результати з експериментальними дослідженнями та традиційними деформаційними методиками. Процес моделювання був здійснений з урахуванням ортотропії деревини, для чого використовувалися об'ємні скінчені елементи, що описують механічні характеристики матеріалу. Зокрема, для деревини були враховані модулі пружності вздовж та впоперек волокон, а також коефіцієнти Пуассона, визначені експериментальними шляхами. Для армованих елементів використовувалися аналогічні елементи, що моделюють вуглецеву стрічку та сталеву арматуру. Отримані результати чисельного моделювання були порівняні з

даними експериментальних досліджень та результатами, отриманими за допомогою деформаційної методики. Статистичний аналіз показав, що чисельне моделювання в ПК ЛІРА-САПР має середнє відхилення від експериментальних даних на рівні 21% для балок з клеєної деревини та 6,5% для деформаційної методики. Для армованих балок відхилення становить 29% для МСЕ і 7,3% для деформаційної методики. Результати чисельного моделювання показали, що програмний комплекс ЛІРА-САПР дозволяє точно визначати напруження та деформації дерев'яних конструкцій, однак деформаційна методика продемонструвала кращу точність для армованих елементів. Статистичний аналіз підтвердив, що обидва підходи є ефективними для проектування, зокрема для армованих конструкцій з деревини, при цьому деформаційна методика є більш точною в умовах підвищеного навантаження. Визначено, що для проектування армованих дерев'яних конструкцій обидва підходи можуть бути використані в залежності від вимог до точності та швидкості моделювання.

Ключові слова: дерев'яні балки, переміщення, клеєна деревина, армовані балки з деревини.

Вступ

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. В нормативних документах України, щодо проектування конструкцій з цільної та клеєної деревини [1-2] відсутні вказівки, щодо розрахунку армованих елементів та конструкцій, не дивлячись на явну ефективність такого прийому при реконструкції, підсиленні і новому будівництві. Для верифікації методики моделювання деформування згинальних дерев'яних елементів було проведено числове дослідження на відомому програмному комплексі ПК ЛІРА-САПР 2024 R2.3, що використовує метод скінчених елементів (далі – МСЕ). Програмний комплекс дозволяє визначати лінійні переміщення та напружено-деформований стан конструкцій, що проектується, шляхом використання різного виду скінчених елементів. Отримані результати можна використати для верифікації моделювання в ЛІРА-САПР, а також порівнянні чисельного моделювання з деформаційними методиками, які описані в роботах [3-12], тим самим підтверджуючи доцільність їх використання.

Мета і завдання дослідження. На даний момент одним з найпопулярніших програмних комплексів у сфері проектування конструкцій в Україні є програмний комплекс ЛІРА-САПР, який використовує МСЕ. Його використання дозволяє швидко і надійно проектувати металеві та залізобетонні конструкції. Проектування таких конструкцій описано в роботі [13]. Водночас програмний комплекс дозволяє моделювання і конструкцій з цільної і клеєної деревини. Приклади моделювання дерев'яних конструкцій МСЕ представлені в роботах [14-19]. Аналізуючи роботи авторів, а також узагальнивши відгуки проєктувальників, можна дійти висновку, що програмний комплекс є

сучасним інструментом в проектуванні будівель і споруд. Тому метою даної статті стало проведення чисельного моделювання за допомогою ПК ЛПРА-САПР, а також порівняння отриманих результатів з експериментальними дослідженнями [20-22] та деформаційними методиками, для вдосконалення процесу проектування.

Матеріали та методи

Методика чисельного моделювання за допомогою МСЕ. Одним з самих популярних скінчених елементів (далі – СЕ), які можуть найточніше описати роботу матеріалу та встановити напружено-деформований стан є СЕ №36 ПК ЛПРА-САПР. Об'ємний СЕ №36 дозволяє описати деревину, як ортотропний пружний матеріал, який враховує при розрахунку об'ємний напружено-деформований стан (далі – НДС) елемента. При цьому для описання матеріалу деревини слід задавати основні характеристики матеріалу, до яких входять: модуль пружності деревини вздовж волокон $E_{1,w}$, модулі пружності деревини впоперек волокон $E_{2,w}, E_{3,w}$, модулі зсуву G_w та коефіцієнти Пуассона деревини ν_w . Для чисельного моделювання деформацій деревини було використано повздовжні коефіцієнти пружності, які були визначені раніше шляхом експериментального випробування деревини, а також прийняті табличні значення модулів пружності деревини поперек волокон, модулів зсуву та коефіцієнти Пуассона. Всі значення пружних характеристик деревини занесені до таблиці 1. Для описання характеристик матеріалів стрічки, а також арматури використано також об'ємні скінчені елементи (СЕ) №36. Елементи задавались, як пружний матеріал з модулями пружності для вуглецевої стрічки та сталевий арматури відповідно E_{arm}, E_c та коефіцієнтами Пуассона ν_{arm}, ν_c . Характеристики вуглецевої стрічки та сталі занесена до табл. 1.

При створенні чисельної моделі експериментально досліджуваних балок з використанням ПК ЛПРА САПР, були збережені всі розміри елемента, а також розміщення та режим прикладання навантаження. Навантаження в чисельно змодельованій балці прикладалось через пластину на відстані 105 см від краю елемента, шляхом прикладання навантаження, відповідно до схеми завантаження в експериментальній частині. На відстані 15 см від краю були встановлені жорсткі в'язі до нижніх планок, які в реальному експерименті відповідали опорам балки. Деревина балки та арматура була змодельована об'ємними елементами розміром 1 см³. Так, як поперечний переріз арматури в чисельно змодельованій балці був більший за прийнятий об'ємний елемент, то було застосовано коефіцієнт приведення 1,13 до модуля пружності арматури, який і враховував значення додаткової площі арматури. Числові моделі ПК ЛПРА

САПР для досліджуваних балок SB, GB показано на рисунку 1 та для балки SRB на рис. 2.

Таблиця 1. Прийняті пружні та деформаційні характеристики матеріалів для моделювання балок

Змодельована балка	Модуль пружності деревини, $E_{1,w}$, МПа	Модуль пружн. впоперек волокон, $E_{2,w}, E_{3,w}$, МПа	Коефіцієнт Пуассона ν_{12}, ν_{21}	Модуль пружн. армат., E_{arm} , МПа	Коефіцієнт Пуассона ν_{arm}	Модуль пружн. вуглец. стрічки, E_c , МПа	Коефіцієнт Пуассона ν_c
SB	15100	400	$\nu_{12} = 0,018$ $\nu_{21} = 0,48$	-	-	-	-
SRB-12	15100	400		198000	0,3	165000	0,3
GB-A	13000	400		-	-	-	-
GB-B	13000	400		-	-	-	-
GRB-12A	13000	400		205000	0,3	165000	0,3
GRB-12B	13000	400		205000	0,3	165000	0,3

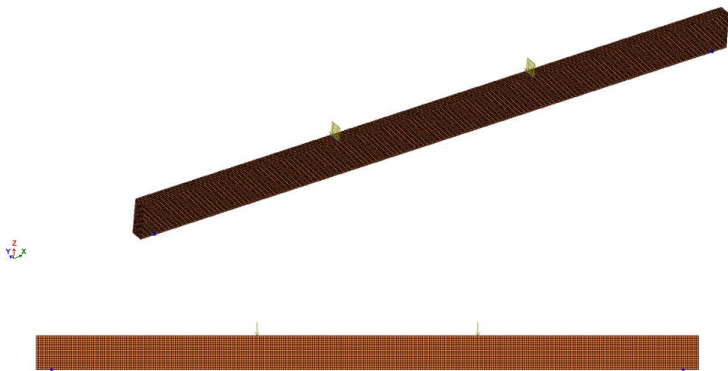


Рис. 1. Модель дерев'яних балок SB, GB в ПК ЛІРА САПР

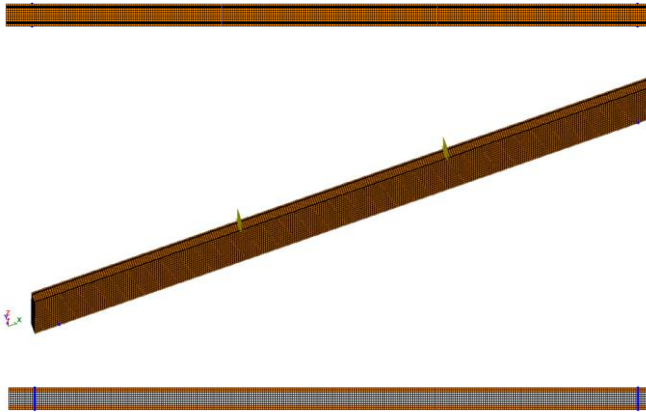


Рис. 2. Модель комбінованоармованої дерев'яної балки SRB в ПК ЛІРА САПР

Результати та обговорення

Зображення отриманих прогинів згинальних дерев'яних елементів показано на рис. 3 підсилених балок SB та непідсилених балок з цільної деревини SBR12 при навантаженні на балку 10кН. Порівняння максимальних прогинів отриманих чисельним моделювання та прогинами отриманим за деформаційною методикою, а також експериментальним шляхом для балки SB зображені на рис. 4. Ці ж дані по балці SBR12 наведено на рис. 5. Проведені статистичні порівняння між отриманими результатами, показали, що максимальний прогин визначений за допомогою ПК ЛІРА-САПР по всьому діапазоні завищений, як і в запропонованій деформаційній методиці. Середнє відхилення прогину по балці SB складає для ПК ЛІРА-САПР $\Delta f_{lira-exp} = 3,63$ мм, а для запропонованої деформаційної методики $\Delta f_{teor-exp} = 1,1$ мм, для армованої балки SBR ці значення рівні $\Delta f_{ira-exp} = 4,49$ мм, $\Delta f_{teor-exp} = 1,87$ мм.

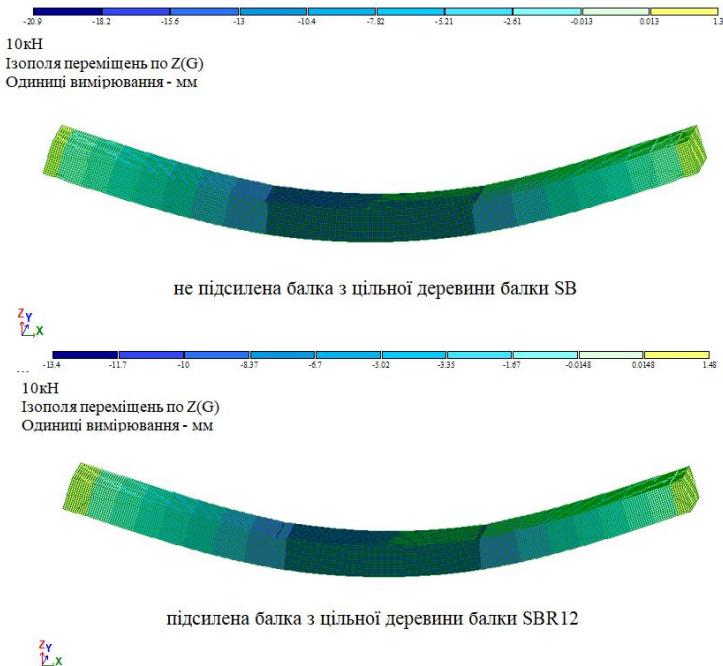


Рис. 3. Ізополя вертикальних переміщень (прогинів) отриманих на ПК ЛПА-САПР для балок з цільної деревини SB та SBR

При цьому різниця між методиками на невисоких рівнях навантаження для досліджувальних балок є невеликою, при збільшенні ж навантаження деформаційна методика дає більш наближений до експериментальних даних результат. Отримані вертикальні переміщення за допомогою ПК ЛПА САПР для серії балок з клеєної деревини зображено на рис. 6.

При статистичному порівнянні отриманих результатів балок з клеєної деревини, встановлено, що максимальний прогин, визначений за допомогою ПК ЛПА-САПР, по всьому діапазоні визначення завищують, як і випадку з цільною деревиною. Запропонована теорія на базі деформаційної методики також завищує максимальні переміщення елемента.

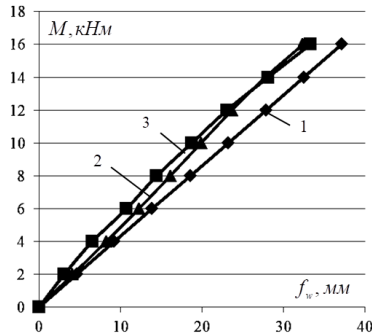


Рис. 4. Порівняння результатів числового моделювання максимальних прогинів балки SB деформаційної моделі та ПК ЛІРА САПР (1 - ПК ЛІРА САПР, 2 – деформаційна модель, 3 – експериментальна балка)

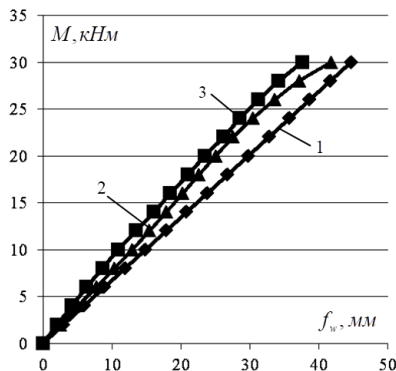


Рис. 5. Порівняння результатів числового моделювання максимальних прогинів балки SBR12 деформаційної моделі та ПК ЛІРА САПР (1 - ПК ЛІРА САПР, 2 – деформаційна модель, 3 – експериментальна балка)

Середнє відхилення прогину по балці GB-A складає для ПК ЛІРА САПР $\Delta f_{lira-exp} = 2,69$ мм, а для запропонованої методики $\Delta f_{teor-exp} = 2,63$ мм, для балки GB-B $\Delta f_{lira-exp} = 1,73$ мм, $\Delta f_{teor-exp} = 1,92$ мм. Для армованих балок середнє значення відхилення прогину по балці GBR-12A $\Delta f_{lira-exp} = 5,0$ мм, $\Delta f_{teor-exp} = 0,8$ мм, а для балки GBR-12B $\Delta f_{lira-exp} = 0,63$ мм, $\Delta f_{teor-exp} = 5,57$ мм.

Результати, отримані за допомогою ПК ЛІРА-САПР та деформаційною методикою, показали задовільну збіжність для клеєних невідсилених балок. Запропонована ж деформаційна методика для відсилених балок показала кращий результат у визначенні прогинів на відміну від ПК ЛІРА-САПР. Графіки отриманих прогинів визначені за різними методиками та експериментальним значенням зображено на рис.7 для неармованих балок та рис.8 для армованих балок.

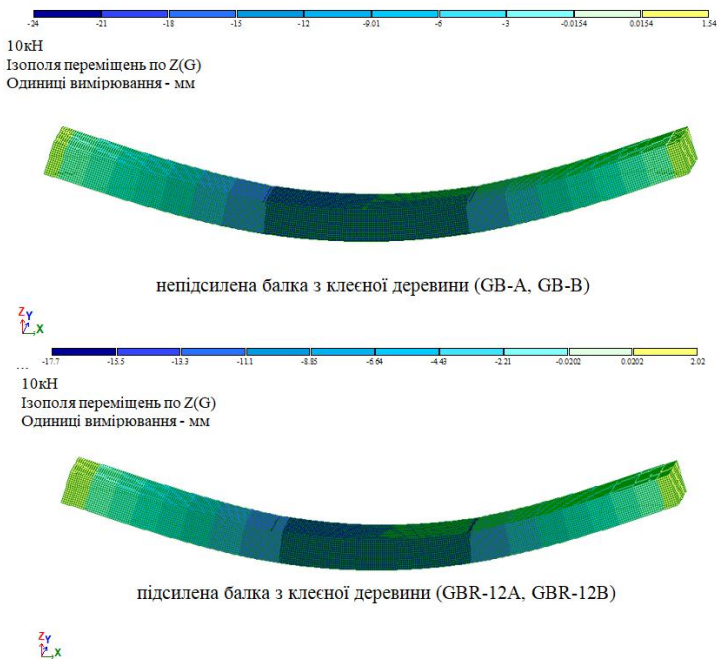


Рис. 6. Ізополю вертикальних переміщень (прогинів) отриманих на ПК ЛІРА-САПР для балок з цільної деревини GB та GBR

Проведено статистичний аналіз отриманих результатів чисельного моделювання МСЕ та натурного експерименту. Щоб зменшити вплив неточності вимірювальних приладів на невисоких рівнях для розрахунку розбіжностей було прийнято дані дослідження, які сягали значень моменту більше 10 кНм. Результати прогинів та вертикальних переміщень наведені в табл. 2.

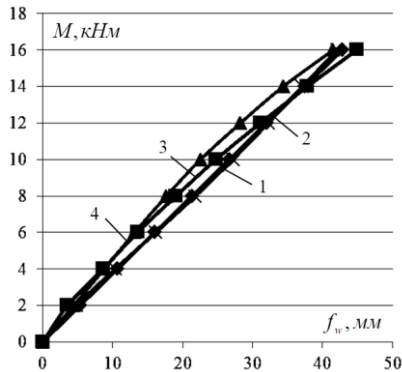


Рис. 7 Порівняння результатів числового моделювання максимальних прогинів балок GB-A, GB-B деформаційної моделі та ПК ЛІРА САПР (1 – прогин ПК ЛІРА САПР, 2 – деформаційна модель, 3,4 – експериментальна балка GB-B, GB-A)

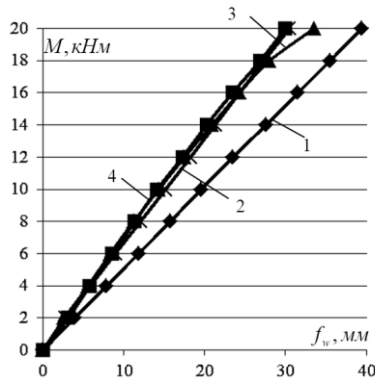


Рис. 8 Порівняння результатів числового моделювання максимальних прогинів балок GBR12A, GBR12B деформаційної моделі та ПК ЛІРА САПР (1 – прогин ПК ЛІРА САПР, 2 – деформаційна модель, 3,4 – експериментальна балка GBR12A, GBR12B)

Проаналізувавши результати можна дійти до висновків, що загальна розбіжність між експериментальними дослідженнями та деформаційними методиками складає 6,5%, для визначення за допомогою ПК ЛІРА САПР 21%. При цьому для дерев'яних не армованих балок відхилення в прогині для деформаційних методик склало 5,6%, а для ПК ЛІРА САПР 12%. Для армованих же балок відхилення деформаційних методик 7,3%, а для ПК ЛІРА САПР 29%. Обидва підходи мають хорошу збіжність результатів,

проте можна сказати, що деформаційна методика є більш точнішою, особливо при проектуванні армованих дерев'яних елементів.

Таблиця 2. Статистичне порівняння результатів числового моделювання ПК ЛІРА САПР та деформаційної моделі для балок

№ п/п	Згинальний момент, кНм	Прогин теоретичний $f_{теор}$, мм	Прогин експерт. f_{exp} , мм	Прогин ПК ЛІРА САПР $f_{ЛІРА}$, мм	Відхилення деф. методики від експериментального значення, %	Відхилення ЛІРИ від експериментального значення, %
SB						
1	10	19,87	18,74	23,22	6,0	23,9
2	14	27,74	28,09	32,46	1,2	15,6
3	16	32,37	33,26	37,1	2,7	11,5
SBR						
4	10	12,95	10,91	14,89	18,7	36,5
5	14	17,88	16,12	20,84	10,9	29,3
6	18	22,63	21,05	26,8	7,5	27,3
7	22	27,57	26,16	32,76	5,4	25,2
8	26	33,62	31,28	38,71	7,5	23,8
9	30	41,76	37,6	44,67	11,1	18,8
GB-A						
10	10	27,17	22,55	26,67	20,5	18,3
11	14	37,09	34,35	37,44	8,0	9,0
12	16	42,11	41,51	42,79	1,4	3,1
GB-B						
13	10	27,17	24,75	26,67	9,8	7,8
14	14	37,09	37,82	37,44	1,9	1,0
15	16	42,11	44,85	42,79	6,1	4,6
GBR12A						
16	10	15,17	14,35	19,56	5,7	36,3
17	14	21,28	20,88	27,59	1,9	32,1
18	18	27,35	28,04	35,5	2,5	26,6
19	20	30,47	33,51	39,44	9,1	17,7
GBR12B						
20	10	15,17	14,13	19,56	7,4	38,4
21	14	21,28	20,23	27,59	5,2	36,4
22	18	27,35	26,89	35,5	1,7	32,0
23	20	30,47	29,96	39,44	1,7	31,6

Висновки

1. За допомогою програмного комплексу ЛІРА-САПР можна достовірно провести чисельне моделювання роботи дерев'яної комбіновано-армованої балки, отримавши при цьому значення напружень, які виникають в різних об'ємних елементах, а також визначити переміщення цих об'ємних елементів з урахуванням ортотропії деревини.

2. Результати отримані шляхом чисельного моделювання максимальних вертикальних переміщень показали задовільну збіжність з результатами експериментальних досліджень. Збіжність результатів складає близько 21% для ПК ЛІРА САПР та 6,5% для аналітичних деформаційних методик, що для деревини є хорошим результатом. При цьому значення отримані МСЕ в ПК ЛІРА-САПР мають відхилення в більшу сторону у всіх балках, що дозволяє забезпечити більшу надійність у визначенні граничного прогину.

3. В загальному, обидві методики визначення деформування є актуальними, показують хороші результати у визначенні максимальних прогинів. Проте до переваг ПК ЛІРА САПР можна віднести автоматизацію, універсальність і швидкість виконання, а до використання деформаційних методик більшу точність моделювання і можливість аналізу процесу руйнування.

4. Запропонована методика моделювання МСЕ в ПК ЛІРА САПР дозволяє припустити можливість застосування його для моделювання будь яких армованих конструкцій з цільної та клеєної деревини.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. DBN V.2.6-161:2017 “Derev’yani konstruktsiyi. Osnovni polozhennya” - Kyiv, “Ukrarkhbudinform” 2017. – 111 s.

2. DSTU-N B V.2.6-184:2012 “Konstruktsiyyi z tsil'noyi i kleyenoyi derevyny. Nastanova z proektuvannya” - Kyiv, “Ukrarkhbudinorm” 2013. – 120s.
3. Pavluk A., Gomon S., Ziatuk Y., Gomon P., Homon S., Kulakovskiy L., Iasnii V., Yasniy O., Imbirovych N. Stiffness of solid wood beams under direct and oblique bending conditions // Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen. – 2023. – Vol. 65(2). – P. 109–122. <https://doi.org/10.2478/afx-2023-0014>
4. Sobczak-Piąstka J., Pavluk A., Gomon S.S., Gomon P., Homon S., Lynnyk I. Changing the position of the neutral line of beams made of glued wood in conditions of oblique bending // AIP Conference Proceedings. – 2023. – Vol. 2928. – Article No. 080007. <https://doi.org/10.1063/5.0170371>
5. Gomon S., Homon S., Gomon P., Shkirenko S. The basis of the deformation method for calculating elements from wood under cross-section bending // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – Vol. 7(4.8). – P. 109–114. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.8.27223>
6. Homon P.S., Polishchuk M.V. Napruzhenno-deformovanyi stan balok iz derevyny z kombiinovanyim armuvanniam na riznykh rivniakh zavantzheniia // Suchasni tekhnolohii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi. – Lutsk : LNTU, 2022. – Vyp. 17. – S. 23–30. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-7\(17\)-03](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-7(17)-03)
7. Homon P.S. Aproksymatsiia diagramy "moment-kryvyna" derevianykh armovanykh ta nearmovanykh balok priamokutnoho pererizu // Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia. – Kyiv: KNUBA, 2021. – № 78. – S. 157–165. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2021.78.157-165>
8. Homon P.S. Modeliuvannia roboty derevianoï balky z poslidovnym zavantzheniym // Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia. – Kyiv: KNUBA, 2022. – № 80. – S. 159–165. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2022.80.159-165>
9. Homon P.S. Sumisnist roboty armatury ta derevyny v balkakh, yaki pratsiuiut za poperechnoho zhynu // Suchasni problemy arkhitektury ta mistobuduvannia. – Kyiv: KNUBA, 2022. – Vyp. 63. – S. 327–335. <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2022.63.327-335>
10. Homon P. Determination of tangential stresses in reinforced flexible wooden elements taking into account the nonlinearity of material deformation // Visnyk Ternopil'skoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. – Ternopil : TNTU, 2022. – Vyp. 106. – S. 125–132. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2022.02.125
11. Homon P., Babych Ye., Polishchuk M., Kysliuk D.Y., Bandura I., Pakholiuk O., Shevchuk A. Deformability of a glued wooden beam with pre-stressed composite reinforcement // Procedia Structural Integrity. – 2024. – Vol. 59. – P. 551–558. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.078>
12. Homon P.S. Analiz vykorystannia metalevoi ta nemetalevoi armatury dlia pidsyleniia derevianykh elementiv ta konstruktsii // Suchasni problemy arkhitektury ta mistobuduvannia. – Kyiv: KNUBA, 2022. – Vyp. 62. – S. 322–332. <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2022.62.322-332>
13. Barabash M.S., Medvedenko D.V., Paliienko O.I. Prohramni kompleksy SAPFIR i LIRA-SAPR – osnova vitchyznianskykh BIM-tekhnolohii : monohrafiia. – Kyiv: Nats. aviats. Unt, 2023. – 156 s.
14. Mykhailovskyi D. Method of calculation of panel buildings from cross-laminated timber // Opir materialiv i teoriia sporud: naukovo-tekhnichniy zbirnyk. – Kyiv: KNUBA, 2021. – Vyp. 107. – S. 75–88. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2021.107.75-88>

15. Mykhailovskyi D.V., Komar A.A. Perekhresno kleiedoshchati paneli ta metody yikh rozrakhunku // Budivelni konstruktсии. Teoriia i praktyka: zbirnyk naukovykh prats / KNUBA. – 2018. – Vyp. 2. – S. 146–153. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.2.2018.146-153>
16. Gomon S. S., Pavlyuk A. P. Robota balok z kleyenoyi derevyny v umovakh kosoho z'hynu. Visnyk L'vivs'koho natsional'noho ahrarnoho universytetu: zb. Nauk. prats'. – L'viv, 2018. – Vyp. 19. – S. 84–89. <https://doi.org/10.31734/architecture2018.19.084>
17. Mykhailovskyi D., Komar M. Analysis of the stress-strain state of laminated timber beams reinforced with composite tapes // Academic Journal Industrial Machine Building, Civil Engineering. – 2022. – № 2(57). – P. 90–97. <https://doi.org/10.26906/znp.2021.57.2590>
18. Mykhailovskyi D.V., Matiushchenko D.M. Metodyka stvorennia rozrakhunkovoї skhemy hnutokleienykh ram za dopomohoiu metodu skinchenykh elementiv. Budivelni konstruktсии. Teoriia i praktyka: zbirnyk naukovykh prats. KNUBA. – 2018. – Vyp. 2. – S. 99–107. https://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/18/2018_2.pdf
19. Mykhailovskyi D. V., Komar M. A. Armuvannia konstruktсии z derevyny kompozytnymy materialamy, stan i perspektyvy. Budivelni konstruktсии, teoriia i praktyka, № 9, KNUBA, 2021, S. 72–80. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.9.2021.72-80>
20. Mykhailovskyi D.V., Homon P.S. Doslidzhennia roboty poperedno-napruzhenykh derevianykh balok z kleienoi derevyny // Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia. – Kyiv: KNUBA, 2024. – № 87. – S. 246–254. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2024.87.246-254>
21. Mykhailovskyi D.V., Homon P.S. Veryfikatsiia metodyk modeliuvannia armovanykh ta narmovanykh derevianykh balok // Resursoekonomni materialy, konstruktсии, budivli ta sporudy. – Rivne : NUVHP, 2024. – Vyp. 46. – S. 237–249. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i46.28>
22. Babych Ye.M., Homon P.S. Eksperymentalni doslidzhennia poperedno napruzhenykh kombinirovano armovanykh balok z tsilnoi derevyny // Resursoekonomni materialy, konstruktсии, budivli ta sporudy. – Rivne : NUVHP, 2024. – Vyp. 45. – S. 96–105. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i45.11>

Література

1. ДБН В.2.6-161:2017 “Дерев’яні конструкції. Основні положення” - Київ, “Укрархбудінформ” 2017. – 111 с.
2. ДСТУ-Н Б В.2.6-184:2012 “Конструкції з цільної і клеєної деревини. Настанова з проєктування” - Київ, “Укрархбудінформ” 2013. – 120с.
3. Pavluk A., Gomon S., Ziatuk Y., Gomon P., Homon S., Kulakovskiy L., Iasnii V., Yasniy O., & Imbировych N. Stiffness of solid wood beams under direct and oblique bending conditions. Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen, 2023, 65(2), 109–122. <https://doi.org/10.2478/afx-2023-0014>
4. Sobczak-Piąstka J., Pavluk A., Gomon S.S., Gomon P., Homon S., Lynnyk I. Changing the position of the neutral line of beams made of glued wood in conditions of oblique bending. AIP Conf. Proc. 2928, 080007, 2023. <https://doi.org/10.1063/5.0170371>
5. Gomon S., Gomon S., Gomon P., Shkirenko S. The basis of the deformation method for calculating elements from wood under cross-section bending. International

Journal of Engineering & Technology, 2018, Vol. 7 (4.8), P. 109–114.
<https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.8.27223>

6. Гомон П.С., Поліщук М.В. Напружено-деформований стан балок із деревини з комбінованим армуванням на різних рівнях завантажень. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. – Луцьк: ЛНТУ, 2022. – Вип. 17. – С. 23–30. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-7\(17\)-03](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-7(17)-03)

7. Гомон П.С. Апроксимація діаграми «момент-кривина» дерев'яних армованих та неармованих балок прямокутного перерізу. Містобудування та територіальне планування. – Київ: КНУБА, 2021. – № 78. – С. 157–165. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2021.78.157-165>

8. Гомон П.С. Моделювання роботи дерев'яної балки з послідовним завантаженням. Містобудування та територіальне планування. – Київ: КНУБА, 2022. – № 80. – С. 159–165. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2022.80.159-165>

9. Гомон П.С. Сумісність роботи арматури та деревини в балках, які працюють за поперечного згину. Сучасні проблеми архітектури та містобудування. – Київ: КНУБА, 2022. – Вип. 63. – С. 327–335. <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2022.63.327-335>

10. Gomon, P. Determination of tangential stresses in reinforced flexible wooden elements taking into account the nonlinearity of material deformation. Вісник Тернопільського національного технічного університету. – Тернопіль: ТНТУ, 2022. – Вип. 106. – С. 125–132. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2022.02.125

11. Gomon P., Babych Ye., Polischuk M., Kysliuk D.Y., Bandura I., Pakholiuk O., Shevchuk A. Deformability of a glued wooden beam with pre-stressed composite reinforcement. Procedia Structural Integrity, 2024, Vol. 59, P. 551–558. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.078>

12. Гомон П.С. Аналіз використання металевої та неметалевої арматури для підсилення дерев'яних елементів та конструкцій. Сучасні проблеми архітектури та містобудування. – Київ: КНУБА, 2022. – Вип. 62. – С. 322–332. <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2022.62.322-332>

13. Барабаш М.С., Медведенко Д.В., Палієнко О.І. Програмні комплекси САПФІР і ЛІРА-САПР – основа вітчизняних ВІМ-технологій: монографія. – Київ: Нац. авіац. ун-т, 2023. – 156 с.

14. Михайловський Д. Method of calculation of panel buildings from cross-laminated timber. Опір матеріалів і теорія споруд: науково-технічний збірник. – Київ: КНУБА, 2021. – Вип. 107. – С. 75–88. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2021.107.75-88>

15. Михайловський Д.В., Комар А.А. Перехресно клеєдощаті панелі та методи їх розрахунку. Будівельні конструкції. Теорія і практика: збірник наукових праць / КНУБА. – 2018. – Вип. 2. – С. 146–153. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.2.2018.146-153>

16. Гомон С. С., Павлюк А. П. Робота балок з клеєної деревини в умовах косого згину. Вісник Львівського національного аграрного університету: зб. наук.

праць. – Львів, 2018. – Вип.. 19. – С. 84–89.
<https://doi.org/10.31734/architecture2018.19.084>

17. Mykhalovskiy D., Komar M. Analysis of the stress-strain state of laminated timber beams reinforced with composite tapes. Academic Journal Industrial Machine Building, Civil Engineering, 2022, № 2(57), P. 90–97.
<https://doi.org/10.26906/znp.2021.57.2590>

18. Михайловський Д.В., Матющенко Д.М. Методика створення розрахункової схеми гнотоклесних рам за допомогою методу скінчених елементів. Будівельні конструкції. Теорія і практика: Збірник наукових праць / КНУБА. – 2018. – Вип. 2. – С. 99–107. https://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/18/2018_2.pdf

19. Д. В. Михайловський, М. А. Комар. Армування конструкцій з деревини композитними матеріалами, стан і перспективи. Будівельні конструкції, теорія і практика № 9 КНУБА, 2021- С. 72-80. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.9.2021.72-80>

20. Михаловський Д.В., Гомон П.С. Дослідження роботи попередньо-напружених дерев'яних балок з клеєної деревини. Містобудування та територіальне планування. – Київ: КНУБА, 2024. – № 87. – С. 246–254.
<https://doi.org/10.32347/2076-815x.2024.87.246-254>

21. Михайловський Д.В., Гомон П.С. Верифікація методик моделювання армованих та неармованих дерев'яних балок. Ресурсоекономі матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – Рівне: НУВГП, 2024. – Вип. 46. – С. 237–249.
<https://doi.org/10.31713/budres.v0i46.28>

22. Бабиць Є.М., Гомон П.С. Експериментальні дослідження попередньо напружених комбіновано армованих балок з цільної деревини. Ресурсоекономі матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – Рівне: НУВГП, 2024. – Вип. 45. – С. 96–105. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i45.11>

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 22.05.2025	Received 22.05.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 23.05.2025	Received in revised form 23.05.2025
Прийнято 01.06.2025	Accepted 01.06.2025
Опубліковано 25.06.2025	Published 25.06.2025

D. V. Mykhailovskiy

Doctor of Technical Sciences, Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3151-8630>

Department of Metal and Timber Structures

Kyiv National University of Construction and Architecture, 31 Povitria Flots Street, Kyiv, Ukraine, 03037

M. A. Komar

PhD in Technical Sciences, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3631-8999>

Junior Research Fellow

SSTC NRS

P. S. Gomon*

Doctoral Student, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5312-0351>

Department of Metal and Timber Structures

Kyiv National University of Construction and Architecture, 31 Povitria Flots Street, Kyiv, Ukraine, 03037

*corresponding author, e-mail: p.s.homon@nuwm.edu.ua

Numerical FEM modeling of deformation solid and glulam reinforced timber beams

How to Cite:

Mykhailovskyi, D. V., Komar, M. A., Gomon, P. S. (2025). Numerical FEM modeling of deformation solid and glulam reinforced timber beams. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 23, 155-170. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-15](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-15)

Abstract. The article presents the results of numerical modeling of the deformation of wooden beams made of laminated and solid timber, performed using the LIRA-SAPR 2024 R2.3 software suite, which utilizes the finite element method (FEM). The possibility of using this software for the design of reinforced timber structures, an issue relevant to the reconstruction and reinforcement of building elements, is explored. The modeling process enables a detailed analysis of the stress-strain state of structures, predicting their behavior under load, and comparing the results with experimental studies and traditional deformation methods. The modeling was carried out taking into account the orthotropy of timber, for which three-dimensional finite elements were used to describe the material's mechanical properties. Specifically, the elastic moduli along and across the grain of the wood, as well as Poisson's ratios, were incorporated, determined experimentally. Reinforced elements were modeled using analogous elements representing carbon strips and steel reinforcement. The obtained numerical results were compared with experimental data and results derived using the deformation method. Statistical analysis showed that the numerical modeling in the LIRA-SAPR software suite has an average deviation from the experimental data of 21% for laminated timber beams and 6.5% for the deformation method. For reinforced beams, the deviation was 29% for FEM and 7.3% for the deformation method. The results of the numerical modeling showed that the LIRA-SAPR software suite allows for the accurate determination of stresses and deformations in wooden structures; however, the deformation method demonstrated higher accuracy for reinforced elements. Statistical analysis confirmed that both approaches are effective for design, particularly for reinforced timber structures, while the deformation method proves to be more accurate under increased load conditions. It was concluded that for the design of reinforced timber structures, both approaches can be used depending on the required accuracy and modeling speed.

Keywords: timber beams, displacements, glued timber, laminated timber, solid timber, reinforced timber beams

УДК 539.3

О. А. Мікуліч

д.т.н., професор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4522-596X>

Кафедра прикладної математики та механіки

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

Т. В. Фурс*

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4786-9980>

Кафедра прикладної математики та механіки

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

І. М. Войтюк

аспірант, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4686-3573>

Кафедра прикладної математики та механіки

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

*автор-кореспондент, e-mail: t.furs@lntu.edu.ua

Дослідження зміни механічних характеристик під впливом ультрафіолету у жорстких пінополіуретанах

Цитувати як:

Мікуліч, О. А., Фурс, Т. В., Войтюк, І. М. (2025). Дослідження зміни механічних характеристик під впливом ультрафіолету у жорстких пінополіуретанах. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 23, 171-181. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-16](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-16)

© 2025, Мікуліч О. А., Фурс Т. В., Войтюк І. М.

Анотація. У статті досліджено вплив ультрафіолету (сонячного світла), як деградуючого фактору, на зміну механічних характеристик жорстких пінополіуретанів (ППУ). Експериментальні дослідження проводилися для зразків, отриманих у лабораторних умовах. Пінополіуретан одержували способом заливки двокомпонентної суміші поліол-поліізоціанат з ваговими частками компонентів 1:2. Описано зовнішній вигляд ППУ.

Механічні характеристики визначали за результатами випробувань дослідних зразків на стиснення методом статичного навантаження. За діаграмами навантаження при статичному стиску визначено модуль Юнга, границю пропорційності, границю пластичності та відносну залишкову деформацію через 5 хвилин після розвантаження зразка. Дослідження проведені для двох серій зразків, одна з яких була свіжовиготовленою та без впливу ультрафіолетового випромінювання, а друга серія зразків піддавалася впливу ультрафіолетового випромінювання протягом трьох місяців. За результатами порівняння двох серій зразків встановлено зміни механічних характеристик жорстких поліуретанових пін, спричинені впливом УФ-випромінювання.

Оцінено стан поверхні поперечного перерізу зразка, опроміненого УФ-випромінюванням, і виявлено, що внутрішня частина зразків, опромінених УФ-випромінюванням, на відміну від зовнішньої поверхні, не зазнала пошкодження матеріалу, що може свідчити про збереження хімічної структури пінополіуретану

та його компонентів у внутрішніх шарах матеріалу. Визначено товщину деградованого поверхневого шару піни внаслідок впливу ультрафіолетового випромінювання протягом 3 місяців.

Встановлено, що вплив УФ-випромінювання (тривалість впливу 3 місяці) викликає незначну, але не критичну зміну механічних характеристик жорстких пінополіуретанів. Однак рекомендується захищати елементи ППУ від тривалого впливу ультрафіолетового світла, щоб запобігти його деградації, зберегти функціональні властивості та запобігти передчасному старінню.

Ключові слова: піна, поліуретан, УФ-деградація, модуль Юнга, міцнісні та деформаційні характеристики.

Вступ

У сучасному будівництві велика увага приділяється енергоефективності, що пов'язано з використанням інноваційних матеріалів. Одним із ключових аспектів у цьому питанні є правильна ізоляція будівельних конструкцій, яка залежить, передусім, від фізико-механічних властивостей матеріалу. Пінополіуретан є прикладом високоефективного ізоляційного матеріалу, який відповідає екологічним стандартам і є безпечним для здоров'я, що робить його ідеальним для використання у будівництві.

Проте, на пінополіуретани здійснює деградуючий вплив багато факторів, зокрема, і ультрафіолетове випромінювання. Оскільки не усі будівельні роботи можуть бути виконані в однакові терміни, актуальним є питання дослідження періоду допустимих термінів, при яких не відбуватиметься значна деградація матеріалу.

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми

Пінополіуретан (ППУ) – це тепло-, гідро- й звукоізоляційний матеріал, що характеризується низькою вагою, хорошою міцністю, оптимальними механічними властивостями, хімічною стійкістю, своєрідною пористою структурою, завдяки якій має найменший коефіцієнт теплопровідності у порівнянні з іншими теплоізоляційними матеріалами [1-2]. З огляду на зазначені особливості, цей матеріал успішно використовується у будівельній галузі для різного роду практичних рішень [3-5].

Пінополіуретан є синтетичним полімером, який отримують шляхом хімічної реакції при змішуванні двох основних компонентів: поліолу й ізоціанату. Поліольний компонент у своєму складі містить також каталізатори, спінювачі й стабілізатори для забезпечення активної хімічної реакції між компонентами й утворення пористої структури.

Додаючи інші добавки можна модифікувати властивості матеріалу залежно від призначення [6]. Власне завдяки технологічності поліуретанові піни можуть мати різні склад, густину і пористість, що визначає їх властивості. Внаслідок цього ППУ може бути як м'яким та еластичним, так

і жорстким і твердим [7]. Для певного практичного рішення у будівництві використовують пінополіуретан, властивості якого відповідають призначенню й умовам експлуатації.

Основне призначення пінополіуретанів – поглинання кінетичної енергії. Вивчення поведінки цих матеріалів в умовах експлуатації базується, переважно, на експериментальних дослідженнях [7]. Зокрема, у роботі [8] наводяться результати випробувань на стиснення з метою визначення кривих навантаження-розвантаження для пінополіуретанових матеріалів. Експериментальні дослідження на стиснення дозволяють вивчати в'язкопружні властивості пін. Так, у роботі [9] представлені результати експериментальних вимірювань для визначення залежності в'язкості пінополіуретану від дисипації енергії.

За результатами механічних випробувань вивчають ударну поведінку поліуретанових пін при різних швидкостях деформації з метою оцінки поглинання енергії [10]. Такі експериментальні дослідження були використані також в роботі [11] для вивчення механічної поведінки та здатності пінополіуретану поглинати енергію.

Результати досліджень щодо зміни реакцій на удар твердих пінополіуретанів з різними швидкостями деформації, які були визначені при одноосовому стисканні при квазістатичних та динамічних швидкостях навантаження, представлені в роботі [12]. У роботі [13] на основі експериментальних досліджень досліджувалася зміна механічних характеристик пінополіуретанів шляхом модифікації їх компонентного складу.

Втім, пінополіуретани в процесі експлуатації можуть піддаватися не лише механічним навантаженням, а й впливу зовнішніх факторів середовища. Одним з таких факторів є дія ультрафіолету (сонячного світла), що може негативно впливати на властивості ППУ, змінюючи структуру, викликаючи деградацію матеріалу, змінюючи і скорочуючи термін його експлуатації, зменшуючи надійність й енергоефективність конструкції. І власне, схильність до впливу ультрафіолету називають одним з недоліків пінополіуретану, що й є тематикою даного дослідження.

Метою даної роботи є дослідження впливу ультрафіолету (сонячного світла) на механічні характеристики жорстких пінополіуретанів.

Методика експериментальних досліджень

Жорсткі поліуретанові піни отримували способом заливки у форми [14]. Для цього механічним способом ретельно змішували необхідні розраховані кількості (вагові) вихідних компонентів поліолу та поліізоціанату (1 : 2) до утворення однорідної суміші. Після змішування суміш, яка швидко починала пінитися, виливали у пластикові форми для подальшого спінювання і тверднення. Всі піни витримували при кімнатній температурі протягом трьох діб для забезпечення стабілізації матеріалу. У

такий спосіб отримували жорсткі поліуретанові композиції пористої структури і заданої форми (рис. 1). З отриманих композицій вирізали дослідні зразки кубічної форми розміром $30 \times 30 \times 30 \text{ мм}^3$.

Механічні характеристики матеріалу ППУ визначали за результатами випробування дослідних зразків на стиснення методом статичного навантаження. Експерименти виконували з використанням випробувальної машини марки МІ-40КУ, яка має програмне забезпечення в поєднанні з ПК.



Рис. 1. Зовнішній вигляд композицій жорсткого ППУ

Першу серію зразків досліджували відразу після виготовлення і не піддавали дії ультрафіолетового випромінювання, а другу – після тривалого витримування (3 місяці) при впливі УФ-випромінювання (сонячного світла) для вивчення ступеня впливу ультрафіолету на механічні характеристики ППУ.

Результати та обговорення

У результаті проведених досліджень встановлено, що жорсткий пінополіуретан змінює свої властивості внаслідок впливу ультрафіолету. Очевидно, ймовірним є те, під дією УФ-випромінювання руйнуються хімічні зв'язки в полімерах з утворення нових функціональних груп, що є продуктами фотоокиснення. Цей стан відомий як фотодеградація і для ППУ проглядається (виражається) у зміні кольору (пожовтінні) поверхні зразків (рис. 2).

Проте, за аналізом перерізу фотодегратованого зразка (рис. 2, крайнє фото справа) встановлено, що внутрішня частина УФ-опромінених зразків, на відміну від зовнішньої поверхні, не зазнала пожовтіння матеріалу, що може свідчити про збереження хімічної структури пінополіуретану та його

компонентів у внутрішніх шарах матеріалу. Товщина деградованого шару поверхні внаслідок впливу ультрафіолету коливається у межах 0,5-0,8 мм.



Рис. 2. Зовнішній вигляд зразків ППУ внаслідок впливу ультрафіолету

Отримані результати аргументуються тими даними, що жорсткі пінополіуретани більш щільні за структурою (мають більшу густину) у порівнянні з м'якими еластичними ППУ і мають високий відсоток закритих пор. Тому такі піни із закритими осередками не дозволяють газам легко виходити з неї та перешкоджають повітрю й сонячному випромінюванню проникати у товщу матеріалу (крім тонкого поверхневого шару) і хімічно взаємодіяти з його внутрішньою частиною.

Типові діаграми деформування ППУ при статичному стиску двох зразків із співвідношення компонентів 1:2 (поліол-ізоціанат), один з яких піддавався дії природного УФ-випромінювання протягом 3 місяців, представлені на рис. 3, 4.

Характер ходу отриманих експериментальних кривих обох серій зразків подібний, однак, величини їх механічних характеристик (модуль Юнга, границя пропорційності, границя плинності і відносна залишкова деформація через 5 хв після розвантаження зразка) дещо відрізняються.

Проведено порівняння результатів досліджень двох серій зразків та встановлено зміни механічних характеристик жорстких поліуретанових пін, спричинені впливом УФ-випромінювання протягом проміжку часу з місяці.

Зокрема, зафіксовано підвищення величини модуля Юнга на 53%, зростання границі пропорційності на 2,6 % й границі плинності на 14 %. Водночас відновлення фотодegradованих зразків ППУ (відносна залишкова деформація через 5 хв після розвантаження зразків) відбувається повільніше на 38 %.

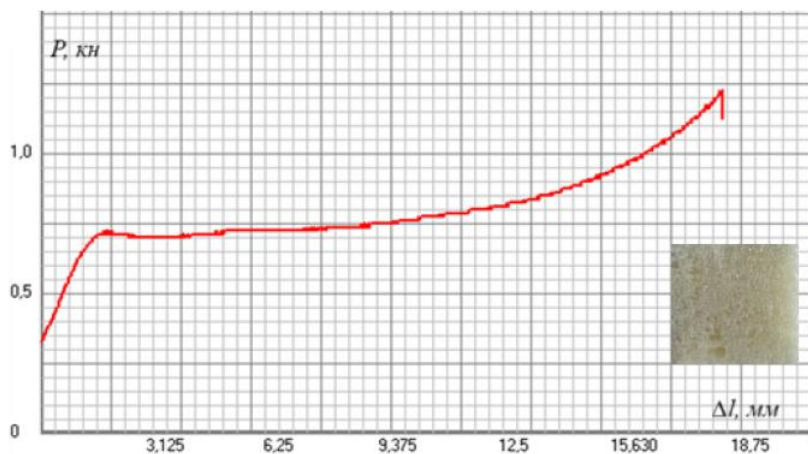


Рис. 3. Діаграма навантаження для без впливу ультрафіолету

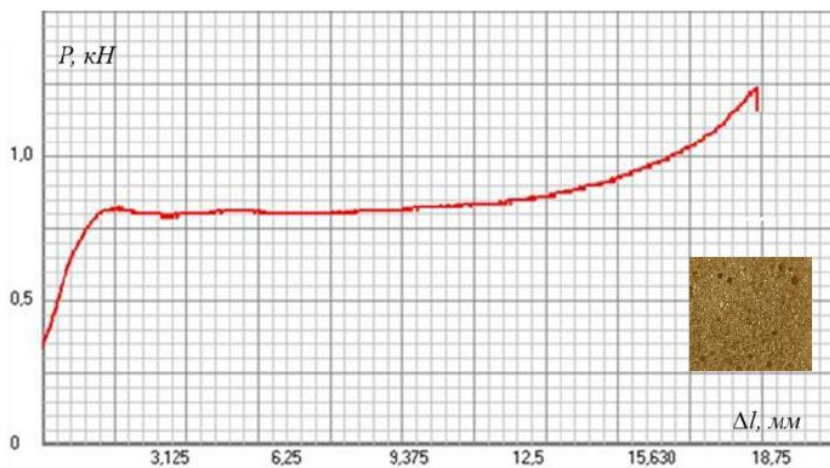


Рис. 4. Діаграма навантаження для УФ-опроміненого ППУ

Значення механічних характеристик, визначені за експериментальними даними досліджень механічних характеристик двох серій зразків ППУ, представлені у порівняльному вигляді на рис. 5.

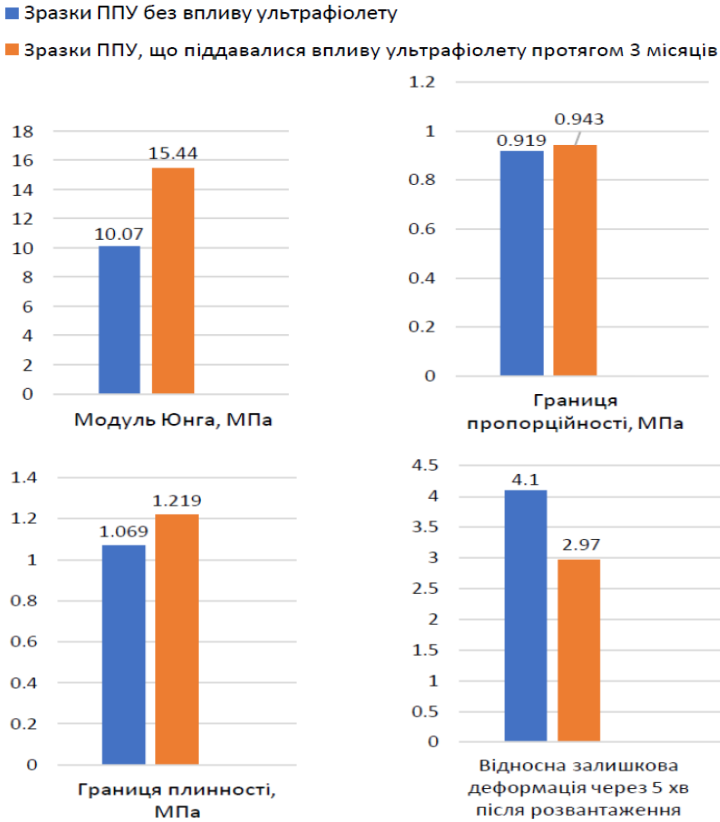


Рис. 5. Механічні характеристики зразків ППУ

Висновки

1. Внаслідок впливу ультрафіолету протягом 3 місяців відбулися зміни механічних характеристик жорстких поліуретанових піन: модуль Юнга збільшився на 53%, підвищилися границя пропорційності на 2,6% та границя текучості на 14%, а відновлення фотодegradованих зразків ППУ (відносна залишкова деформація через 5 хв після розвантаження зразків) відбувається повільніше на 38 % порівняно із матеріалом, що не піддавався впливу ультрафіолету. Це означає, що ультрафіолет викликає зниження еластичності матеріалу.

2. Встановлено, що ультрафіолетове випромінювання (сонячне світло) викликає фотоокислення зовнішньої поверхні жорстких ППУ з утворенням продуктів деградації, що проявляється візуально у вигляді

пожовтіння поверхні, але без видимих змін внутрішньої частини матеріалу. Товщина деградованого поверхневого шару піни внаслідок впливу ультрафіолету протягом 3 місяців становить 0,5 – 0,8 мм. Зміни механічних характеристик обумовлені, найімовірніше, більшою мірою внеском поверхневого фотоокисненого шару матеріалу, ніж поведінкою внутрішньої частини зразка.

3. При експлуатації вироби з ППУ доцільно захищати від тривалого впливу ультрафіолету, щоб запобігти його деградації, зберегти функціональні властивості та запобігти передчасному старінню.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. Das, A.; Mahanwar, P. A brief discussion on advances in polyurethane applications. *Adv. Ind. Eng. Polym. Res.* 2020, 3, 93–101.
2. Wang Z., Wang C., Gao Y., Li Z., Shang Y, Li H. Porous Thermal Insulation Polyurethane Foam Materials. *Polymers.* 2023, 15(18):3818. <https://doi.org/10.3390/polym15183818>
3. Tychanicz-Kwiecień, M., Wilk, J., & Gil, P. (2019). Review of High-Temperature Thermal Insulation Materials. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 33(1), 271–284. <https://doi.org/10.2514/1.T5420>
4. Pan, L. A review of research on the performance of building insulation materials. *Urban Constr. Theory Res. Electron. Ed.* 2015, 1776–1777. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2015.05.002>
5. S. Abu Dabous, T. Ibrahim, S. Shareef, E. Mushtaha, I. Alsyouf: Sustainable façade cladding selection for buildings in hot climates based on thermal performance and energy consumption. *Results in Engineering*, 16, 100643 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100643>

6. Mikulich O.A., Furs T.V., Shemet V.Ia., Voitiuk I.M. Vplyv modyfikatoriv na strukturno-fizychni kharakterystyky zhorstkykh pinopoliiuretaniv. Zbirnyk naukovykh prats «Suchasni tekhnolohii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi». Lutsk, LNTU. 2024, Vyp. 22. S. 126-135. Šebenik, U.; Krajnc, M. Influence of the soft segment length and content on the synthesis and properties of isocyanate-terminated urethane prepolymers. *Int. J. Adhes. Adhes.* 2007, 153, 527–535. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-12\(22\)-12](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-12(22)-12)
1. Šebenik, U.; Krajnc, M. Influence of the soft segment length and content on the synthesis and properties of isocyanate-terminated urethane prepolymers. *Int. J. Adhes. Adhes.* 2007, 153, 527–535. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2006.10.001>
7. Bělík, R. & Fusek, M. (2019). Loading and Unloading Curve of Foam Material Based on Compression Test. *Strojnícky časopis - Journal of Mechanical Engineering*, 69(3), 2019. 3-8. <https://doi.org/10.2478/scjme-2019-0023>
8. M. Abdullah, S. Ramtani, N. Yagoubi, Mechanical properties of polyurethane foam for potential application in the prevention and treatment of pressure ulcers. *Results in Engineering* 19 (2023) 101237. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101237>
9. P. Viot, Hydrostatic compression on polypropylene foam. *International Journal of Impact Engineering*. 36 (7) (2008) 975-989.
10. W. Ju, L. Jifeng, L. Lei, Research on Static Compression Test of Polyurethane Foam/Honeycomb Paperboard Composite Material. *The Open Materials Science Journal*. 9 (2015) 64-70.
11. J. V. Mane, S. Chandra, S. Sharma, H. Ali, V. M. Chavan, B. S. Manjunath, R. J. Patel, Mechanical Property Evaluation of Polyurethane Foam under Quasi-static and Dynamic Strain Rates - An Experimental Study. *Procedia Engineering*. 173 (2017) 726 – 731. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.12.160>
12. Mikulich, O.; Hulay, O.; Furs, T.; Shemet, V. Strength and mechanical characteristics of modified polyurethane foams. *Procedia Struct. Integr.* 2024, 59, 460–465. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.065>
13. T.V. Furs, O.V. Sad, O.A. Mikulich, O.I. Hulai, V.Ia. Shemet. Tekhnolohichni aspekty oderzhannia pinopoliiuretanu sposobom zalyvky. Mizhvuzivskyi zbirnyk «Naukovi notatky». Lutsk, 2024, № 78. S. 37-42. <https://doi.org/10.36910/775.24153966.2024.78.5>

Література

1. Das, A.; Mahanwar, P. A brief discussion on advances in polyurethane applications. *Adv. Ind. Eng. Polym. Res.* 2020, 3, 93–101.
2. Wang Z., Wang C., Gao Y., Li Z., Shang Y, Li H. Porous Thermal Insulation Polyurethane Foam Materials. *Polymers*. 2023, 15(18):3818. <https://doi.org/10.3390/polym15183818>
3. Tychanicz-Kwiecień, M., Wilk, J., & Gil, P. (2019). Review of High-Temperature Thermal Insulation Materials. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 33(1), 271–284. <https://doi.org/10.2514/1.T5420>
4. Pan, L. A review of research on the performance of building insulation materials. *Urban Constr. Theory Res. Electron. Ed.* 2015, 1776–1777. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2015.05.002>
5. S. Abu Dabous, T. Ibrahim, S. Shareef, E. Mushtaha, I. Alsayouf: Sustainable façade cladding selection for buildings in hot climates based on thermal performance and

energy consumption. Results in Engineering, 16, 100643 (2022).
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100643>

6. Мікуліч О.А., Фурс Т.В., Шемет В.Я., Войтюк І.М. Вплив модифікаторів на структурно-фізичні характеристики жорстких пінополіуретанів. *Збірник наукових праць «Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві»*. Луцьк, ЛНТУ. 2024, Вип. 22. С. 126-135. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-12\(22\)-12](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-12(22)-12)

7. Šebenik, U.; Krajnc, M. Influence of the soft segment length and content on the synthesis and properties of isocyanate-terminated urethane prepolymers. *Int. J. Adhes. Adhes.* 2007, 153, 527–535. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2006.10.001>

8. Bělík, R. & Fusek, M. (2019). Loading and Unloading Curve of Foam Material Based on Compression Test. *Strojnícky časopis - Journal of Mechanical Engineering*, 69(3), 2019. 3-8. <https://doi.org/10.2478/scjme-2019-0023>

9. M. Abdullah, S. Ramtani, N. Yagoubi, Mechanical properties of polyurethane foam for potential application in the prevention and treatment of pressure ulcers. *Results in Engineering* 19 (2023) 101237. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101237>

10. P. Viot, Hydrostatic compression on polypropylene foam. *International Journal of Impact Engineering*. 36 (7) (2008) 975-989.

11. W. Ju, L. Jifeng, L. Lei, Research on Static Compression Test of Polyurethane Foam/Honeycomb Paperboard Composite Material. *The Open Materials Science Journal*. 9 (2015) 64-70.

12. J. V. Mane, S. Chandra, S. Sharma, H. Ali, V. M. Chavan, B. S. Manjunath, R. J. Patel, Mechanical Property Evaluation of Polyurethane Foam under Quasi-static and Dynamic Strain Rates - An Experimental Study. *Procedia Engineering*. 173 (2017) 726 – 731. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.12.160>

13. Mikulich, O.; Hulay, O.; Furs, T.; Shemet, V. Strength and mechanical characteristics of modified polyurethane foams. *Procedia Struct. Integr.* 2024, 59, 460–465. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.065>

14. Т.В. Фурс, О.В. Сад, О.А. Мікуліч, О.І. Гулай, В.Я. Шемет. Технологічні аспекти одержання пінополіуретаніу способом заливки. *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки»*. Луцьк, 2024, № 78. С. 37-42. <https://doi.org/10.36910/775.24153966.2024.78.5>

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 13.05.2025	Received 13.05.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 14.05.2025	Received in revised form 14.05.2025
Прийнято 01.06.2025	Accepted 01.06.2025
Опубліковано 25.06.2025	Published 25.06.2025

O. A. Mikulich

D.Sc. in Engineering, Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4522-596X>
 Department of Applied Mathematics and Mechanics
 Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

T. V. Furs*

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4786-9980>
 Department of Applied Mathematics and Mechanics
 Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

I. M. Voitiuk

Ph.D. Student, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4686-3573>

Department of Applied Mathematics and Mechanics

Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

*corresponding author, e-mail: t.furs@lntu.edu.ua

Research on the change of mechanical characteristics under the influence of ultraviolet in rigid polyurethane foams

How to Cite:

Mikulich, O. A., Furs, T. V., Voitiuk I. M. (2025). Research on the change of mechanical characteristics under the influence of ultraviolet in rigid polyurethane foams. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 23, 171-181. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-16](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-16)

Abstract. The paper investigated the influence of ultraviolet (sunlight) as a degrading factor on the change in the mechanical characteristics of rigid polyurethane foams (PPU). Experimental studies were performed for groups of samples obtained in laboratory conditions. Mechanical characteristics were determined based on the results of tests of experimental samples under the action of a compressive load simulating static deformation. Polyurethane foam was obtained by pouring a two-component polyol-polyisocyanate mixture with weight fractions of components 1:2. The appearance of PPU compositions is described.

Mechanical characteristics were determined based on the results of tests of experimental samples under the action of a compressive load simulating static deformation. According to the load diagrams under static compression, Young's modulus, proportional limit, plastic limit, and relative residual deformation were determined 5 min after unloading the sample. The studies were conducted for two series of samples, one of which was freshly manufactured and without exposure to ultraviolet light, and the second series of samples was exposed to ultraviolet light for three months. The results of the studies of two series of samples were compared, and changes in the mechanical characteristics of rigid polyurethane foams caused by the influence of UV radiation were established.

The state of the surface of the cross-section of the UV-irradiated sample was assessed and it was found that the inner part of the UV-irradiated samples, unlike the outer surface, did not undergo yellowing of the material, which may indicate the preservation of the chemical structure of the polyurethane foam and its components in the inner layers of the material. The thickness of the degraded surface layer of the foam due to the influence of ultraviolet light for 3 months was determined.

It was established that the effect of UV radiation (exposure duration 3 months) causes a slight but not critical change in the mechanical characteristics of rigid polyurethane foams. However, it is recommended to protect PPU elements from prolonged exposure to ultraviolet light to prevent their degradation, preserve functional properties, and prevent premature aging.

Keywords: foam, polyurethane, UV-degradation, Young's modulus, strength, and deformation characteristics.

УДК624.9

Ю. В. Олевич*

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5919-9945>

Кафедра будівництва

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15,
Івано-Франківськ, Україна, 76019

А. С. Величкович

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2685-8753>

Кафедра будівництва

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15,
Івано-Франківськ, Україна, 76019

А. В. Андрусяк

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2099-9045>

Кафедра будівництва

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15,
Івано-Франківськ, Україна, 76019

І. І. Палійчук

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8443-2702>

Кафедра будівництва

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15,
Івано-Франківськ, Україна, 76019

*автор-кореспондент, e-mail: yurii.olevych@nung.edu.ua

Числовий аналіз міцності та жорсткості багатопустотної плити зі швидкотверднучого високоміцного бетону

Цитувати як:

Олевич Ю. В., Величкович А. С., Андрусяк А. В., Палійчук І. І. (2025). Числовий аналіз міцності та жорсткості багатопустотної плити зі швидкотверднучого високоміцного бетону. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 23, 182-195. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-17](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-17)

© 2025, Олевич Ю. В., Величкович А. С., Андрусяк А. В., Палійчук І. І.

Анотація. Швидкотверднучий високоміцний бетон поєднує високу ранню міцність із підвищеною щільністю структури, що робить його перспективним матеріалом для ефективного виробництва збірних залізобетонних конструкцій. У статті наведено результати числового моделювання напружено-деформованого стану залізобетонної багатопустотної плити із використанням об'ємної скінченно-елементної моделі, реалізованої в програмному комплексі ЛІРА-САПР. На відміну від традиційних підходів, заснованих на застосуванні пластинчастих скінченних елементів, у роботі побудовано повноцінну об'ємну модель, яка враховує реальну геометрію порожнин і дозволяє більш точно описати локальний розподіл напружень у бетонному тілі конструкції. З огляду на складну топологію плити, сітку скінченних елементів формували за допомогою комбінованого підходу. При триангуляції моделі одночасно використовували шестивузлові та восьмивузлові

об'ємні скінченні елементи, що дозволило зберігати баланс між точністю опису і обчислювальною ефективністю. При цьому було застосовано фізично нелінійні універсальні просторові скінченні елементи, а деформаційні властивості бетону описано експоненціальним законом деформування. Попередньо напружена робоча арматура моделювалась універсальними просторовими стержневими скінченними елементами, а її механічні властивості описувались діаграмою Прандтля. За результатами розрахунку визначено характер розподілу внутрішніх зусиль, прогинів та напружень, зокрема в області дії максимального згинального моменту та в зонах анкерування арматури. Установлено орієнтовне значення максимального корисного навантаження, при якому конструкція досягає граничного стану за жорсткістю, задовольняючи при цьому умови міцності. Оцінку міцності виконано за критерієм Кулона-Мора, що дозволило врахувати складний напружений стан, а також характерну для бетонів нерівність меж міцності при розтягу та стиску.

Ключові слова: швидкотверднучий високоміцний бетон, багатопустотна залізобетонна плита, числове моделювання, прогини, напруження, граничне навантаження, жорсткість, міцність.

Вступ

Будівельна індустрія постійно шукає шляхи підвищення ефективності матеріалів, щоб відповідати зростаючим вимогам щодо швидкості, якості та екологічності будівництва. Одним із таких матеріалів у будівельній галузі є бетон, який характеризується хорошими механічними властивостями та високою економічністю. Недоліком бетону є значні терміни набору проектної міцності, що часто стає основним обмеженням при швидкому будівництві, ремонтних роботах, особливо при виготовленні залізобетонних конструкцій, де потрібна прискорена готовність конструкції до навантаження. Саме тому використання швидкотверднучих високоміцних бетонів дає змогу підвищити швидкість виготовлення конструкцій та прискорити темпи будівництва.

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Номенклатура бетонів, що використовуються в сучасному будівництві, надзвичайно широка і постійно розширюється. Цьому значною мірою сприяє науково-технічний прогрес в технології в'язких матеріалів, заповнювачів і різноманітних добавок до бетону [1]. На сьогодні бетон залишається основним будівельним матеріалом. Проте, тривалий час набору міцності, значні викиди CO₂ під час виробництва портландцементу та потреба у підвищенні довговічності бетону для складних архітектурних проектів спонукають до розробки нових типів бетону, які поєднують високу продуктивність із мінімальним впливом на довкілля. Одними із таких типів бетону є швидкотверднучі та високоміцні бетони, розробка і дослідження яких набули значних масштабів у наш час [2–6].

Так, у роботах [7–9] встановлено, що для досягнення покращених міцнісних характеристик бетону, як в ранньому так і проектному віці,

важливим фактором є ефективне проектування складу цементних композицій та бетонних сумішей, що забезпечує оптимізацію гранулометричного складу компонентів на різних структурних рівнях. Використання хімічних добавок також відіграє важливу роль в кінетиці тверднення бетону та сприяє зростанню його ранньої міцності[10].

Авторами [11] розроблено наномодифіковані швидкотверднучі високоміцні бетони, армовані дисперсними базальтовими волокнами. В проектному віці міцність на стиск таких бетонів досягає 108.6–118.8 МПа. Такі бетони можуть успішно використовуватись для створення захисних укріплень та фортифікаційних споруд спеціального призначення, що є актуальним на сьогоднішній день.

При розробці нових типів бетону, значну увагу вчені приділяють екологічним аспектам, а саме зменшенню викидів CO₂ в атмосферу[12-14]. У роботі [15] проаналізовано досвід зниження "вуглецевого сліду" у будівельній галузі за рахунок широкого використання низькоемісійних цементів. В результаті проведених досліджень, отримано клінкер-ефективний бетон із швидким наростанням міцності ($f_{cm2}/f_{cm28}=0,51$).

Слід зазначити, що використання бетонів високих класів має позитивний економічний ефект за рахунок зменшення поперечного перерізу конструкції, що дає змогу одержати економію на матеріалах[16].

Швидкотверднучі високоміцні бетони також використовують при виробництві залізобетонних конструкцій масового характеру, якими є багатопустотні плити перекриття. Згідно [17] багатопустотна плита – залізобетонна конструкція, що представляє собою плоский елемент постійної товщини з поздовжніми пустотами, армований попередньо напруженою або звичайною арматурою і призначена для несучих частин перекриттів будівель і споруд різного призначення. У праці [18] розроблено і досліджено швидкотверднучий високоміцний бетон на основі надшвидкотверднучої портландцементної композиції, який використовують для виробництва багатопустотних плит перекриття. В дослідженні [19] розроблено аналітичну модель контактної взаємодії в багатошарових бетонних виробках з включеннями. Враховуючи широке використання даних конструкцій у багатоповерхових будівлях, виникає потреба точного аналізу їхньої поведінки під навантаженням, особливо з урахуванням складної геометрії порожнин і впливу попередньо напруженої арматури. Використання числового моделювання дасть змогу дослідити напружено-деформований стан та несучу здатність конструкції.

Мета і завдання дослідження. Метою цієї роботи є розробка об'ємної скінченно-елементної моделі багатопустотної залізобетонної плити з високоміцного бетону на основі надшвидкотверднучої портландцементної композиції у ЛПРА-САПР і оцінка її напружено-деформованого стану, включаючи прогини, напруження та граничне корисне навантаження.

Матеріали та методи

У дослідженні проведено числове моделювання напружено-деформованого стану багатопустотної залізобетонної плити, яка є широкоживим елементом міжповерхових перекриттів у цивільному та промисловому будівництві. Довжина змодельованої плити становить 6 м, ширина – 1.2 м, а товщина – 220 мм. З огляду на симетрію геометричних параметрів та граничних умов, а також зважаючи на довгомірність конструкції на рис. 1 представлено половину моделі плити по довжині, тобто на ділянці $L/2 = 3.0$ м.

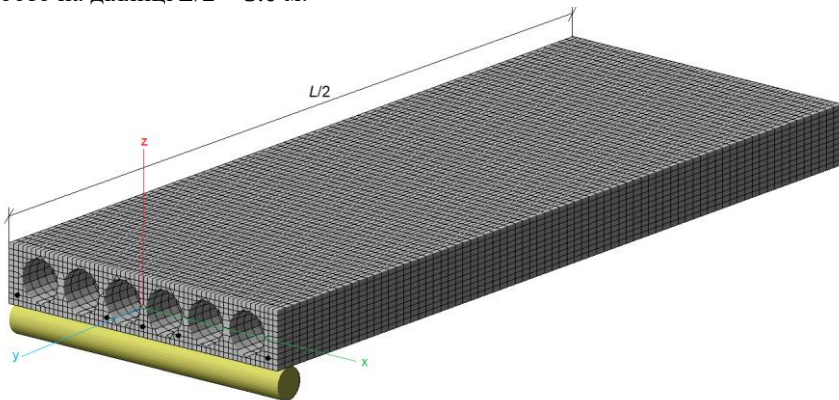


Рис. 1. Скінченно-елементна модель плити

На відміну від традиційного підходу, який передбачає використання пластинчастих скінченних елементів, у цьому дослідженні реалізовано тривимірну об'ємну модель. Такий підхід зумовлений необхідністю точного врахування геометричної складності внутрішніх порожнин та розподілу матеріалу, що характерно для багатопустотних плит, а також для можливості коректного опису локального напруженого стану в зонах концентраторів. Модель побудовано у програмному комплексі ЛІРА-САПР, який забезпечує широкі можливості для нелінійного аналізу складних конструктивних систем. Геометрія бетонної матриці враховувала точне розташування порожнин, сформованих за допомогою пустотоутворювачів. З огляду на складну топологію, сітку скінченних елементів формували за допомогою комбінованого підходу. При тріангуляції моделі одночасно використовували шестивузлові та восьмивузлові об'ємні скінченні елементи, що дозволило зберігати баланс між точністю опису і обчислювальною ефективністю. Зазначимо, що було вибрано фізично нелінійні універсальні просторові скінченні елементи.

За базовий матеріал для досліджуваної багатопустотної залізобетонної плити взято високоміцний швидкотверднучий бетон на основі надшвидкотверднучої портландцементної композиції. Такий бетон

характеризується високою міцністю на стиск 60–130 МПа та швидким набором міцності на ранніх стадіях тверднення бетону ($f_{cm2}/f_{cm28} > 0,5$). Для високоміцної бетонної матриці прийнято наступні характеристики (їх було визначено експериментально у попередніх дослідженнях): початковий модуль пружності бетону – 52.6 ГПа; коефіцієнт Пуассона – 0.19; щільність – 2430 кг/м³. Міцнісні характеристики бетону включають межу міцності на стиск – 83.0 МПа та розтяг – 6.6 МПа (визначену при згинанні експериментальних взірців). Деформаційні властивості бетону описано експоненціальним законом деформування, що дає змогу врахувати нелінійність стискання та тріщиноутворення на пізніших стадіях навантаження.

Робоча арматура моделювалась окремо шляхом введення універсальних просторових стержневих скінченних елементів, вузли яких зв'язано з відповідними вузлами бетонної матриці. У конструкції передбачено п'ять арматурних стержнів діаметром 14 мм зі сталі класу А500, механічні властивості якої враховувалися через діаграму Прандтля (пружно-пластична поведінка). Плита моделювалась із попередньо напруженою арматурою. Початкове напруження в арматурі, яке виникало від натягу, встановлювалось як 60% від межі текучості арматурної сталі.

Граничні умови передбачали шарнірне закріплення обох коротких торців плити, що відповідає умовам обпирання на реальні конструктивні елементи. Навантаження включало власну вагу плити та рівномірно розподілене корисне навантаження, яке моделювалось як тиск, прикладений до верхньої поверхні.

Особливу увагу було приділено аналізу сіткової збіжності. Проведено серію тестових задач із поступовим зменшенням розміру елементів, результати яких показали стабільність отриманих переміщень та напружень при певному рівні подрібнення. Остаточно сформована модель містила 63343 скінченних елемента, що забезпечує необхідну деталізацію для адекватної оцінки напружено-деформованого стану.

У моделі враховано ефект зсувів у бетоні, який суттєво впливає на оцінку прогинів у плитах з великою висотою перерізу та наявністю порожнин. Крім того, враховано обтиснення бетону від впливу натягу арматури, що особливо важливо при моделюванні попередньо напружених елементів. Такий рівень деталізації дозволяє аналізувати як глобальні параметри конструкції (прогини, реакції, напруження), так і локалізовані зони концентрації напружень.

Результати та обговорення

З метою оцінки несучої здатності запропонованої залізобетонної плити було проведено її числове моделювання із поступовим збільшенням прикладеного корисного навантаження. У межах цього аналізу визначались критичні значення вертикальних переміщень, нормальних та еквівалентних

напружень у бетоні, а також вивчалась локалізація зон концентрації напружень, зокрема в областях анкерування арматури.

На рис. 2 подано хромограму вертикальних переміщень плити при максимальному прикладеному корисному навантаженні 118.2 кН, що відповідає рівномірно розподіленому навантаженню 16.42 кН/м². Максимальне осідання плити в цьому навантаженому стані досягло 24 мм. Це значення становить гранично допустимий прогин відповідно до нормативної умови жорсткості $\delta_{\max} \leq L/250$. Таким чином, при зафіксованому навантаженні плита впритул досягає межового стану за жорсткістю.

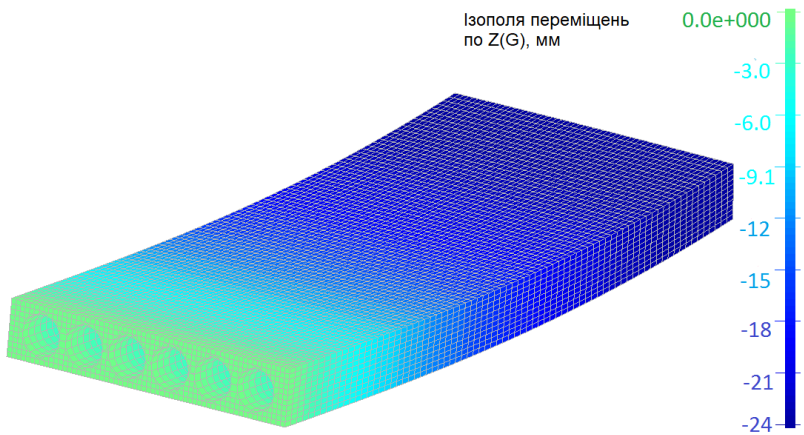


Рис. 2. Хромограма вертикальних переміщень плити (корисне навантаження 118,2 кН)

На рис. 3 показано хромограму нормальних напружень вздовж осі у в центральній частині плити (фрагментовано найбільш напружені середні 2 м її довжини). Аналіз отриманих даних свідчить про наявність несиметричного розподілу осьових напружень щодо нейтральної осі. У верхньому шарі бетону спостерігається зона інтенсивного стиску із максимальними напруженнями до 12 МПа. У нижньому шарі, навпаки, реалізуються розтягуючі напруження, максимальне значення яких становить 4.9 МПа. Зазначимо, що через суттєвий контраст жорсткості між матеріалом арматурних стрижнів та навколишньою бетонною матрицею, нормальні напруження в арматурі перевищують відповідні значення в бетоні на порядок (але не перевищують граничних значень для арматури). Така різниця різниці значень істотно впливає на інтерпретацію хромограми, оскільки кольорова шкала автоматично адаптується до максимальних напружень в арматурі, що призводить до втрати деталізації в бетоні. З цієї причини для побудови хромограм напруженого стану в бетоні арматурні

елементи були виключені з розгляду, аби зосередити увагу саме на розподілі напружень у бетонному тілі плити.

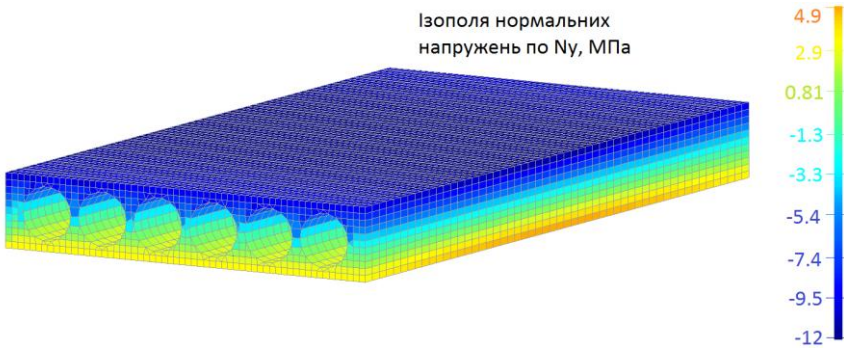
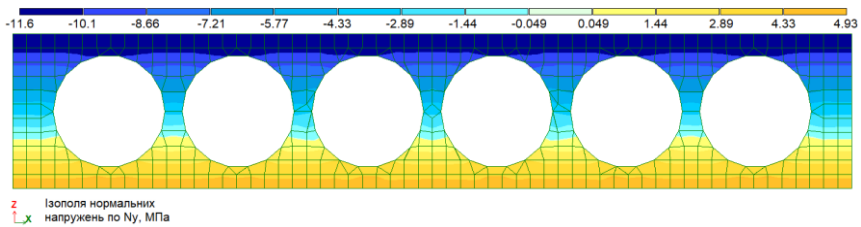
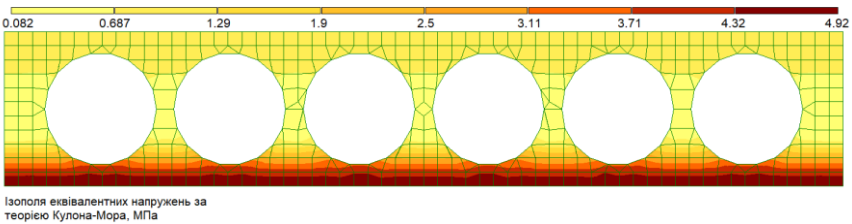


Рис. 3. Хромограма нормальних напружень вздовж осі z (показано середні 2 м плити)



а



б

Рис. 4. Ізополя нормальних (а) та еквівалентних (б) напружень в центральному поперечному перерізі плити

Максимальне значення еквівалентних напружень склало 4.93 МПа. Це значення потрібно порівнювати з допустимим розтягуючим напруженням для бетону, тож ми бачимо, що воно наближається до граничного значення з точки зору розтягувальної міцності бетону, але не

досягає його. Таким чином, у найбільш навантаженій зоні плити граничний стан за міцністю ні у верхній, ні у нижній частинах перерізу не досягається.

Окрему увагу було приділено аналізу зон анкерування робочої арматури. На рис. 5 представлено ізополя нормальних напружень, які демонструють виражену локалізацію інтенсивних стискаючих напружень у зонах фіксації арматури. Максимальні стискаючі напруження в цих ділянках досягають найвищих значень – 18.9 МПа, що однак не перевищує нормативного ліміту для вибраного бетону при стисканні. Однак наявність таких пікових значень потребує уваги при проектуванні арматурного каркасу та визначенні довжини анкерування, оскільки локальне перенапруження може спричинити утворення мікротріщин або передчасне руйнування поверхонь зчеплення. Вочевидь подальші дослідження доцільно спрямувати на аналіз чутливості швидкотверднучого високоміцного бетону до концентрації напружень. Зокрема, актуальним є вивчення впливу довжини анкерування, діаметра арматури та параметрів контактної взаємодії “бетон-арматура” на рівномірність розподілу поля напружень. Також перспективним є застосування оптимізованих схем армування для зменшення локальних піків напруженого стану і підвищення тріщиностійкості конструкції.

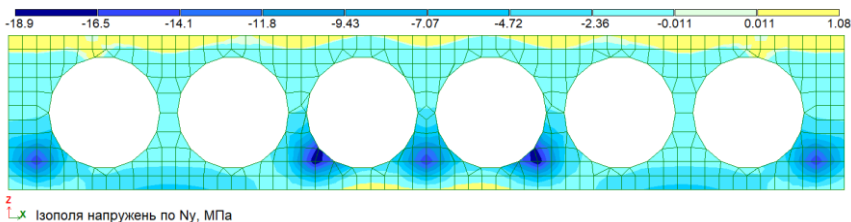


Рис. 5. Концентрація напружень в зонах анкерування робочої арматури

Отож, аналіз результатів моделювання показує, що запропонована **плита досягає граничного стану за жорсткістю** при прикладеному корисному навантаженні 118.2 кН. Це підтверджує її конструктивну ефективність при заданих розмірах та армуванні. **Найбільш напружені ділянки** з точки зору розтягу локалізуються в нижньому шарі бетону в центральній за довжиною частині плити, де еквівалентні напруження Кулона-Мора близькі до граничних. **Зона анкерування** арматури виявляють концентрацію стискаючих напружень, що не перевищують допустимих значень, проте вимагають ретельного конструювання контактних ділянок.

Висновки

Побудовано об'ємну скінченно-елементну модель багатопустотної залізобетонної плити, яка успішно імітує просторову геометрію конструкції з урахуванням порожнин, вплив на поведінку плити попередньо напруженої арматури та фізичну нелінійність матеріалів.

Встановлено орієнтовне значення граничного корисного навантаження. Отримані результати аналізу показали, що при рівномірно розподіленому навантаженні 16.42 кН/м^2 (загальна величина корисного навантаження 118.2 кН) прогин плити досягає граничного значення, що відповідає граничному стану за жорсткістю. У цьому ж стані навантаження максимальні нормальні напруження в плиті задовольняють умову міцності.

Застосування критерію міцності Кулона-Мора дало змогу здійснити комплексну оцінку напруженого стану із урахуванням неоднакових характеристик бетону при розтягу і стиску. Визначено, що еквівалентні напруження Мора досягають значення 4.93 МПа , що наближається до граничного опору бетону на розтяг і потребує подальшої перевірки на тріщиностійкість.

Виявлено концентрацію напружень у зонах анкерування арматури, де максимальні стискаючі напруження досягають 18.9 МПа . Ці зони мають вирішальне значення для довговічності плити та повинні бути детально проаналізовані при проектуванні.

Загалом проведене числове моделювання підтверджує ефективність об'ємного підходу для аналізу залізобетонних конструкцій складної геометрії. Запропонована методика може бути рекомендована для уточнення проектних рішень, оцінки залишкової несучої здатності при реконструкції, а також для інженерного супроводу заходів із підсилення плит перекриття.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. Dvorkin L., Zhytkovskiy V., Makarenko R. Vysokomitsni betony : navchalnyi posibnyk. Rivne, 2022. 216 s.
2. Marushchak U., Sydor N., Mazurak O., Mazurak R. Doslidzhennia shvydkotverdnuchykh betoniv, modyfikovanykh kompleksnoi nanodobavkoiu. *Visnyk Lvivskoho natsionalnoho ahrarynoho universytetu. Arkhitektura i silskohospodarske budivnytstvo*. 2018. № 19. S. 90–93. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vldau_2018_19_19
3. Kropyvnytska T., Sanytsky M., Rucinska T., Rykhlytska O. Development of nanomodified rapid hardening clicker-efficient concretes based on Portland-composite cements. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies. Technology involves organic and inorganic substances*. 2019. Vol. 6, no. 6. P. 38–48. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.185111>
4. Gowram I., Beulah M. Experimental and Analytical Study of High-Strength Concrete Containing Natural Zeolite and Additives. *Civil Engineering Journal*. 2022. Vol. 8, no. 10. P. 2318–2335. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2022-08-10-019>
5. Mo F, Li B, Li M, Fang Z, Fang S, Jiang H. Rapid-hardening and high-strength steel-fiber-reinforced concrete: effects of curing ages and strain rates on compressive performance. *Materials*. 2023. Vol. 16, no. 14. Article 4947. <https://doi.org/10.3390/ma16144947>
6. Elfakhry M., Zamrawi A., Ibrahim W., Sherif A. Experimental study on the mechanical properties and structural performance of the rapid hardening concrete. *Journal of Engineering and Applied Science*. 2024. Vol. 71, Article 74. <https://doi.org/10.1186/s44147-024-00410-0>
7. Yu R., Zhang X., Hu Y., Li J., Zhou F., Liu K., Zhang J., Wang J., Shui Z. Development of a rapid hardening ultra-high performance concrete (R-UHPC): From macro properties to micro structure. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 329, Article 127188. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127188>
8. Andrusyak A. V., Silchuk D. V., Velychkovych A. S. Assessment of the efficiency of designing the compositions of concrete mixtures using alternative aggregates from the natural resources of the Carpathian region. *Modern technologies and methods of calculations in construction*. 2024. No. 21. P. 15–28. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-11\(21\)-02](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-11(21)-02)
9. Influence of Coarse Aggregate Type on the Mechanical Strengths and Durability of Cement Concrete/ L. Wang et al. *Coatings*. 2021. Vol. 11, no. 9. P.1036. <https://doi.org/10.3390/coatings11091036>
10. Singh G., Lallotra B. Achieving early strength in concrete using admixture. *AIP Conference Proceedings*. 2023. Vol. 2558, Article 020063. <https://doi.org/10.1063/5.0121270>
11. Korolko S., Serediuk B. (2021). Nanomodyfikovani vysokomitsni betony, armovani dyspersnymi bazaltovymi voloknami. *Viiskovo-tekhnichnyi zbirnyk*. 2021. №24. S. 57–63. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.24.2021.57-63>

12. Miller S., John V., Pacca, S., Horvath A. Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050. *Cement and Concrete Research*. 2018. Vol. 114, P. 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.026>
13. Schneider M. The cement industry is on the way to a low-carbon future. *Cement and Concrete Research*. 2019. Vol. 124, Article 105792. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105792>
14. Feiri T., Kuhn S., Wiens U., Ricker M. Designing for climate neutrality: Evaluation of reinforced-concrete slab systems regarding emission reduction targets. *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 95, Article 110220. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110220>
15. Sanytskyi M., Kropyvnytska T., Kruts T., Heviuk I. Modyfikovani shvydkotverdnuchi klinker-efektyvni betony. 2019. *Budivelni materialy ta vyroby*. №1-2. S. 24–28. <https://doi.org/10.48076/2413-9890.2020-101-04>
16. Rotko S., Uzhehova O., Zadorozhnikova I., Riabyi O. Analiz efektyvnosti vykorystannia vysokomitsnykh betoniv u stysnutykh elementakh monolitnykh karkasnykh budivel. 2024. *Suchasni tekhnologii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi*. №22. S. 191–198. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-12\(22\)-19](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-12(22)-19)
17. DSTU B V.2-6-53:2008. Konstruktsii budynkiv i sporud. Plyty perekryttiv zalizobetonni bahatopustotni dlia budivel i sporud. Tekhnichni umovy. Chynnyi vid 2010-01-01. Vyd. ofits. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 2009. 36 s.
18. Olevych Yu. V. Nadshvydkotverdnuchi portlandsementni kompozytsii ta modyfikovani vysokomitsni betony na yikh osnovi: dys. ...kand. tekhn. nauk (doktora filosofii): 05.23.05. Lviv, 2019. 186 s.
19. Velychkovych A., Ropyak L., Dubei O. Strength Analysis of a Two-Layer PETF-Concrete Column with Allowance for Contact Interaction between Layers. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 2021. P. 1–10. <https://doi.org/10.1155/2021/4517657>

Література

1. Дворкін Л., Житковський В., Макаренко Р. Високоміцні бетони : навчальний посібник. Рівне, 2022. 216 с.
2. Марущак У., Сидор Н., Мазурак О., Мазурак Р. Дослідження швидкотверднучих бетонів, модифікованих комплексною нанодобавкою. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Архітектура і сільськогосподарське будівництво*. 2018. № 19. С. 90–93. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vldau_2018_19_19
3. Kropyvnytska T., Sanytsky M., Rucinska T., Rykhlytska O. Development of nanomodified rapid hardening clicker-efficient concretes based on Portland-composite cements. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies. Technology involves organic and inorganic substances*. 2019. Vol. 6, no. 6. P. 38–48. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.185111>

4. Gowram I., Beulah M. [Experimental and Analytical Study of High-Strength Concrete Containing Natural Zeolite and Additives](#). *Civil Engineering Journal*. 2022. Vol. 8, no. 10. P. 2318–2335. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2022-08-10-019>

5. Mo F, Li B, Li M, Fang Z, Fang S, Jiang H. Rapid-hardening and high-strength steel-fiber-reinforced concrete: effects of curing ages and strain rates on compressive performance. *Materials*. 2023. Vol. 16, no. 14. Article 4947. <https://doi.org/10.3390/ma16144947>

6. Elfakhry M., Zamrawi A., Ibrahim W., Sherif A. Experimental study on the mechanical properties and structural performance of the rapid hardening concrete. *Journal of Engineering and Applied Science*. 2024. Vol. 71, Article 74. <https://doi.org/10.1186/s44147-024-00410-0>

7. Yu R., Zhang X., Hu Y., Li J., Zhou F., Liu K., Zhang J., Wang J., Shui Z. Development of a rapid hardening ultra-high performance concrete (R-UHPC): From macro properties to micro structure. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 329, Article 127188. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127188>

8. Andrusyak A. V., Silchuk D. V., Velychkovych A. S. Assessment of the efficiency of designing the compositions of concrete mixtures using alternative aggregates from the natural resources of the Carpathian region. *Modern technologies and methods of calculations in construction*. 2024. No. 21. P. 15–28. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-11\(21\)-02](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-11(21)-02)

9. Influence of Coarse Aggregate Type on the Mechanical Strengths and Durability of Cement Concrete/ L. Wang et al. *Coatings*. 2021. Vol. 11, no. 9. P.1036. <https://doi.org/10.3390/coatings11091036>

10. Singh G., Lallotra B. Achieving early strength in concrete using admixture. *AIP Conference Proceedings*. 2023. Vol. 2558, Article 020063. <https://doi.org/10.1063/5.0121270>

11. Королько С., Середюк Б. (2021). Наномодифіковані високоміцні бетони, армовані дисперсними базальтовими волокнами. *Військово-технічний збірник*. 2021. №24. С. 57–63. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.24.2021.57-63>

12. Miller S., John V., Pacca, S., Horvath A. Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050. *Cement and Concrete Research*. 2018. Vol. 114, P. 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.026>

13. Schneider M. The cement industry is on the way to a low-carbon future. *Cement and Concrete Research*. 2019. Vol. 124, Article 105792. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105792>

14. Feiri T., Kuhn S., Wiens U., Ricker M. Designing for climate neutrality: Evaluation of reinforced-concrete slab systems regarding emission reduction targets. *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 95, Article 110220. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110220>

15. Саницький М., Кропивницька Т., Круць Т., Гев'юк І. Модифіковані швидкотверднучі клінкер-ефективні бетони. 2019. *Будівельні матеріали та вироби*. №1-2. С. 24–28. <https://doi.org/10.48076/2413-9890.2020-101-04>

16. Ротко С., Ужегова О., Задорожнікова І., Рябий О. Аналіз ефективності використання високоміцних бетонів у стиснутих елементах монолітних каркасних будівель. 2024. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. №22. С. 191–198. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-12\(22\)-19](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-12(22)-19)

17. ДСТУ Б В.2-6-53:2008. Конструкції будинків і споруд. Плити перекриттів залізобетонні багатопустотні для будівель і споруд. Технічні умови. Чинний від 2010-01-01. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 36 с.

18. Олевич Ю. В. Надшвидкотверднучі поргланццементні композиції та модифіковані високоміцні бетони на їх основі: дис. ...канд. техн. наук (доктора філософії): 05.23.05. Львів, 2019. 186 с.

19. Velychkovych A., Ropyak L., Dubei O. Strength Analysis of a Two-Layer PETF-Concrete Column with Allowance for Contact Interaction between Layers. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 2021. P. 1–10. <https://doi.org/10.1155/2021/4517657>

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 10.05.2025	Received 10.05.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 12.05.2025	Received in revised form 12.05.2025
Прийнято 01.06.2025	Accepted 01.06.2025
Опубліковано 25.06.2025	Published 25.06.2025

Y. V. Olevych*

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5919-9945>
Department of Construction
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76019

A. S. Velychkovych

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2685-8753>
Department of Construction
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76019

A. V. Andrusiak

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2099-9045>
Department of Construction
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76019

I. I. Paliichuk

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8443-2702>
Department of Construction
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76019

*corresponding author, e-mail: yurii.olevyich@nung.edu.ua

Numerical analysis of the strength and stiffness of a hollow-core slab made of high-strength rapid-hardening concrete

How to Cite:

Olevych Y. V., Velychkovych A. S., Andrusiak A. V., Paliichuk I. I. (2025). Numerical analysis of the strength and stiffness of a hollow-core slab made of high-strength rapid-hardening concrete. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 23, 182-195. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-17](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-17)

Abstract. High-strength, rapidly hardening concrete combines high early strength with increased structural density, making it a promising material for the efficient production of precast concrete structures. The article presents the results of numerical modeling of the stress-strain state of a reinforced concrete hollow-core slab using a volumetric finite element model implemented in the LIRA-SAPR software package. Unlike traditional approaches based on plate finite elements, this work develops a comprehensive volumetric model that accounts for the actual geometry of the voids, enabling a more accurate description of the local stress distribution within the concrete body of the structure. Given the complex topology of the slab, the finite element mesh was formed using a combined approach. During model triangulation, both six-node and eight-node volumetric finite elements were employed simultaneously to balance descriptive accuracy and computational efficiency. Physically nonlinear universal spatial finite elements were applied, with the deformation properties of concrete described by an exponential deformation law. The prestressed reinforcement was modeled using universal spatial rod finite elements, and its mechanical properties were defined by the Prandtl diagram. The calculations determined the distribution patterns of internal forces, deflections, and stresses, particularly in the region of maximum bending moment and in the anchorage zones of the reinforcement. An approximate value of the ultimate useful load was established at which the structure reaches the limit state in terms of stiffness while satisfying the strength condition. The strength assessment was performed using the Coulomb-Mohr criterion, which accounted for the complex stress state, including principal stresses, and reflected the characteristic disparity in concrete's tensile and compressive strength limits.

Keywords: rapid-hardening high-strength concrete, reinforced concrete hollow-core slab, numerical modeling, deflections, stresses, ultimate load, stiffness, strength.

624:011

О. А. Пахолук*

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0650-6446>

Кафедра будівництва та цивільної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

В. П. Самчук

к.т.н., доцент, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9045-9525>

Кафедра будівництва та цивільної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

О. С. Чапук

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0283-1863>

Кафедра будівництва та цивільної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

В. І. Малиха

магістр, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9446-1880>

Кафедра будівництва та цивільної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

* автор-кореспондент, e-mail: orest.pakholiuk@gmail.com

Утеплення будівель із фасадами складної конфігурації

Цитувати як:

Пахолук, О.А., Самчук В.П., Чапук О.С., Малиха, В.І. (2025). Утеплення будівель із фасадами складної конфігурації. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 23, 196-209. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-18](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-18)

© 2025, Пахолук, О.А., Самчук В.П., Чапук О.С., Малиха, В.І.

Анотація. Проведення енергоефективних заходів суттєво знизить навантаження на енергосистему країни, особливо в опалювальний період, бо дозволить істотно знизити втрати через оболонку та комунікації. Ріст тарифів є потужним стимулом для проведення комплексної термомодернізації будівель.

Заходи з енергоефективності не лише економлять кошти, але й сприяють підвищенню комфорту термомодернізованих будівель. провідну роль у цьому відіграє утеплення огорожувальних конструкцій. Насамперед, це зовнішні стіни, покриття і перекриття. При плануванні заходів з утеплення важливо дотримуватись актуальних норм і стандартів. За статистикою у значній кількості модернізованих будівель застосовано «конструктивну схему збірної системи з опорядженням легкими тонкошаровими штукатурками».

Для даної технології важливе значення має рівність поверхні, яка не завжди присутня. Існуючі будівлі зводились у різні часові періоди. Для надання їм архітектурної унікальності було застосовано різні технології і варіанти. Коли такі фасади утеплюють, виникає деяка складність. У деяких випадках це збільшує вартість робіт, бо зростає потреба у матеріалах. Деколи підготовка основи вагомо збільшує тривалість і трудомісткість.

Базово можна виділити три типи виступаючих форм на цегляних фасадах будівель різного періоду будівництва:

- фігурна цегляна кладка із дрібномасштабними (до 10 см) декоративними елементами. Зустрічається переважно на будівлях, зведених у радянський період, і представлений, як правило, у формі простих геометричних орнаментів.

- фігурна цегляна кладка, притаманна переважно історичним спорудам минулих століть. Значна кількість таких об'єктів може мати статус пам'ятки архітектури. Проведення реноваційних робіт на подібних об'єктах завжди вимагає індивідуального підходу, зумовленого їхнім архітектурним та історичним значенням, і тому не є предметом детального аналізу в рамках поточного дослідження.

- включає будівлі, переважно громадського призначення, що мають на фасадах пілястри та контрфорси (або псевдоконтрфорси). Третій тип буде об'єктом наших досліджень.

Ключові слова: енергоефективність, утеплення, ізоляція, пілястри, контрфорси.

Вступ

З початком повномасштабного вторгнення росії в Україну питання енергетичної безпеки житлових та громадських будівель вкрай загострилось. Тому проведення енергоефективних заходів суттєво знизить навантаження на енергосистему країни, особливо в опалювальний період, бо дозволить істотно знизити втрати через оболонку та комунікації. Ріст тарифів є потужним стимулом для проведення комплексної термомодернізації будівель. Однак на даний час тарифи на електроенергію ростуть, а на централізоване опалення та газ – ні. А саме ці статті комунальних витрат є найбільшими.

Аналіз останніх досліджень. Потенціал енергозбереження в Україні є значним. 34 % його зосереджено у житловому секторі, 28 % - у промисловості, 21 % - у сфері трансформації енергії. 12 % потенціалу зосереджено у секторі послуг, близько 4% - у сільському господарстві [1].

Заходи з енергоефективності не лише економлять кошти, але й сприяють підвищенню комфорту термомодернізованих будівель. провідну роль у цьому відіграє утеплення огорожувальних конструкцій [2, 3]. Насамперед, це зовнішні стіни, покриття і перекриття. При плануванні заходів з утеплення важливо дотримуватись актуальних норм [4, 6] і стандартів [5].

Метою даної роботи є розгляд способів прийняття рішень стосовно вибору схеми утеплення фасадів зі складною конфігурацією.

Матеріали та методи

Діючими нормами [6] передбачено три базові типи зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією, викладено їх конструктивні рішення та варіанти застосування.

Експлуатаційна придатність варіантів ізоляції оцінюється рядом фізико-механічних характеристик, оскільки конструкції будуть піддаватися впливу температур і вологи, вітру снігу та механічних навантажень [7].

Норми [6] визначають можливість застосування певних видів систем та матеріалів з огляду на їх властивості, форму та характеристики.

Згідно з порядком вимоги до енергоефективності повинні переглядатись кожних 5 років. Так, затверджені у 2006-му, вони змінювались у бік підвищення в 2013-му, 2016-му та 2021 -му роках.

Забезпечити дотримання таких високих вимог можливо лише із застосуванням матеріалів з високою ефективністю (низькою теплопровідністю). Найчастіше для цього застосовують мінераловатні матеріали, пінополістирол бісерний та екструдований, піноскло.

За статистикою у значній кількості модернізованих будівель застосовано «конструктивну схему збірної системи з опорядженням легкими тонкошаровими штукатурками» [6].

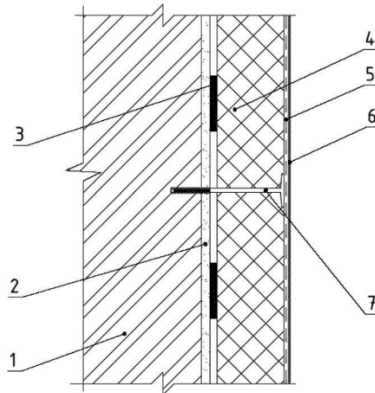


Рис. 1. Схема утеплення

1 – стіна; 2 – вирівнювальний шар; 3 – шар клею; 4 – ізоляція; 5 – гідро-армо шар; 6 – декоративний шар; 7 – дюбель

Для даної технології важливе значення має рівність поверхні, яка не завжди присутня.

Існуючі будівлі зводились у різні часові періоди. Для надання їм архітектурної унікальності було застосовано різні технології і варіанти. Коли такі фасади утеплюють, виникає деяка складність. У деяких випадках це збільшує вартість робіт, бо зростає потреба у матеріалах. Деколи підготовка основи вагомо збільшує тривалість і трудомісткість.

Базово можна виділити три типи виступаючих форм на цегляних фасадах будівель різного періоду будівництва.

Перший тип (рис. 2). Фігурна цегляна кладка із дрібномасштабними (до 10 см) декоративними елементами. Цей тип архітектурного оформлення переважно зустрічається на будівлях, зведених у радянський період, і представлений, як правило, у формі простих геометричних орнаментів.



Рис. 2. Цегляна кладка другої половини XX століття

Зазначені елементи кладки типові для зовнішніх стін, які не були передбачені для подальшого теплоізоляційного оснащення. В такому випадку, найбільш доцільним технічним рішенням є демонтаж (зрізання або збивання) цих виступів, що дозволяє досягти вирівнювання площини фасаду для подальших оздоблювальних чи теплоізоляційних робіт.

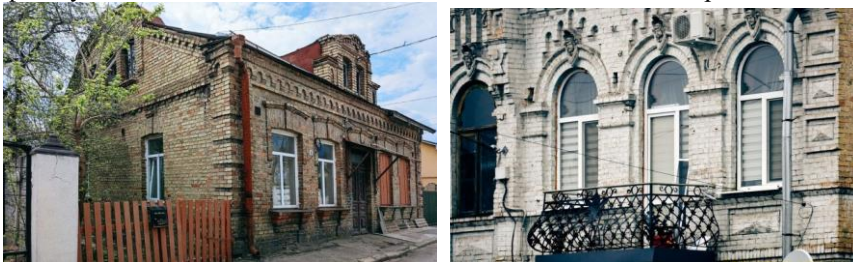


Рис. 3. Фігурна цегляна кладка XIX-початку XX століття

Друга категорія нерівностей (рис. 3). представлена фігурною цегляною кладкою, притаманною переважно історичним спорудам минулих століть. Значна кількість таких об'єктів може мати статус пам'ятки архітектури. Проведення реноваційних робіт на подібних об'єктах завжди вимагає індивідуального підходу, зумовленого їхнім архітектурним та

історичним значенням, і тому не є предметом детального аналізу в рамках поточного дослідження.

Третій тип (рис. 4) включає будівлі, переважно громадського призначення, що мають на фасадах пілястри та контрфорси (або псевдоконтрфорси).



Рис. 4. Пілястри та контрфорси на фасадах громадських будівель

«Піля́стра, також піля́стр або піля́стер (фр. pilastre) — плоский вертикальний прямокутний у плані виступ на поверхні стіни або стовпа. Зовні має ознаки колони. Може мати як конструктивну, так і декоративну функції, наприклад, для підсилення або членування стіни, обрамлення прорізів. Іноді пілястри використовували в каркасній архітектурі. Тоді проміжки в каркасі з пілястр заповнювали якимось будівельним матеріалом. Найчастіше пілястри використовували в декоративній ролі для оздоблення і ритмічного членування порожнього тла стіни» [8].

«Контрфо́рс (фр. contre force — «протидіюча сила») або підстінок — вертикальна конструкція у вигляді висунутої назовні частини стіни, вертикального ребра чи окремої опори, зв'язаної зі стіною аркутаном. Призначена для посилення несучої стіни через прийняття на себе горизонтального зусилля розпору від склепінь.

Зовнішня поверхня контрфорса може бути вертикальною, ступінчастою або безперервно похилою, збільшуючись в перерізі до основи.

Якщо контрфорс не навантажений горизонтальною силою, то його називають псевдоконтрфорсом, який служить тільки прикрасою споруди» [9].

Третій тип буде об'єктом наших досліджень.

Розміри цих елементів можуть варіюватися у широкому діапазоні, від 5 см до 1 м. Наявність таких значних виступів створює додаткові складнощі в процесі утеплення. Це зумовлює зростання трудомісткості робіт, збільшення витрат теплоізоляційних матеріалів або ускладнення технологічних операцій у випадку демонтажу (зрізання/збивання) цих елементів, особливо при їхніх незначних розмірах, коли це економічно недоцільно.

Результати та обговорення

Для проведення розрахункової частини дослідження, ми приймаємо цегляну стіну з базовою товщиною 510 мм, утеплену по основній площині базальтовою ватою товщиною 150 мм.

У рамках аналізу були розглянуті варіанти фасадів з пілястрами шириною 500 мм, які виступають від основної площини стіни на 100, 200 та 300 мм відповідно.



Рис. 5. Основна площина

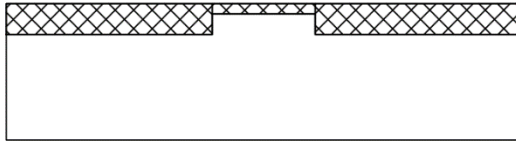


Рис. 6. Виступ 100 з товщиною утеплення торцевої частини 50 мм

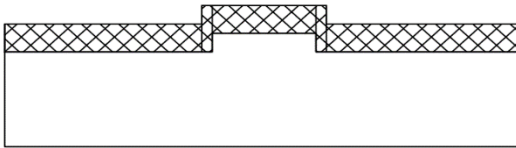


Рис. 7. Виступ 100 з товщиною утеплення бічних поверхонь 50 мм

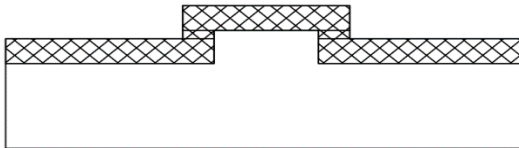


Рис. 8. Виступ на 200 мм

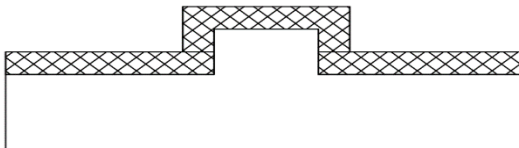


Рис. 9. Виступ на 300 мм

Для оцінки базової вартості прийнято середню висоту будівлі 12 м, а також вартість теплоізоляційних робіт у розмірі 2500 грн./м². Вартість робіт з утеплення, розрахована на один елемент, представлена у Таблиці 1.

Таблиця 1. Питома вартість робіт з утеплення

Виступ, мм	Висота, м	Додаткова площа	Вартість робіт з утеплення, грн/м ²	Вартість робіт з утеплення на 1 елемент, грн
100	12	2,4	2500	6000
200	12	4,8	2500	12000
300	12	7,2	2500	18000
400	12	9,6	2500	24000

При виконанні теплоізоляційних робіт для фасадних конструкцій необхідно враховувати, що об'єм та вартість робіт зростатимуть прямо пропорційно кількості наявних виступаючих елементів. Зокрема, для будівлі висотою 12 м, кожні додаткові 100 мм виступу зумовлюють збільшення вартості на один елемент приблизно на 6000 грн.

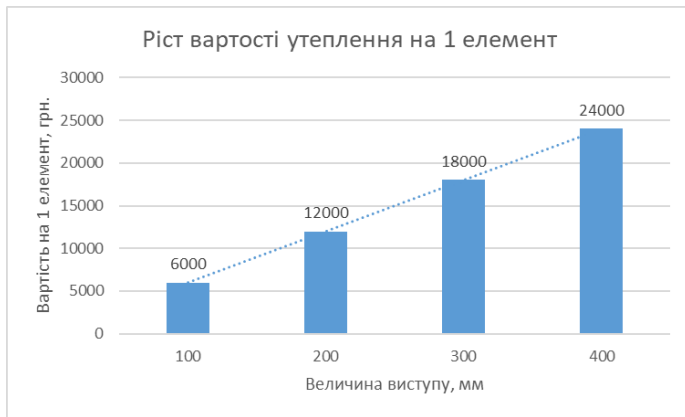
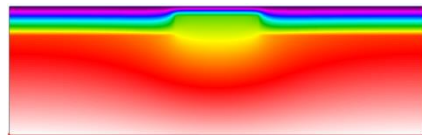
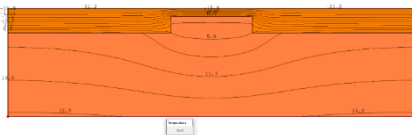
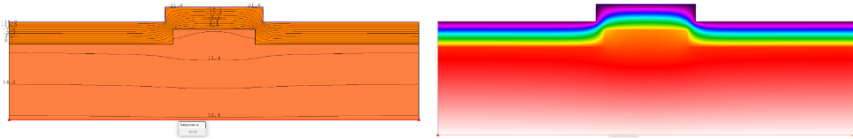


Рис.10. Динаміка зростання вартості теплоізоляції одного елемента

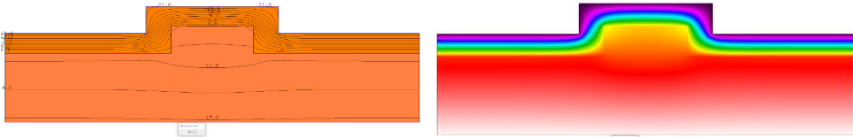
Товщина утеплювача 150 мм,



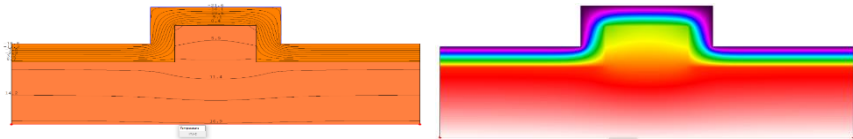
а) 16,2 °C



б) 17,1 °C



в) 17,1 °C



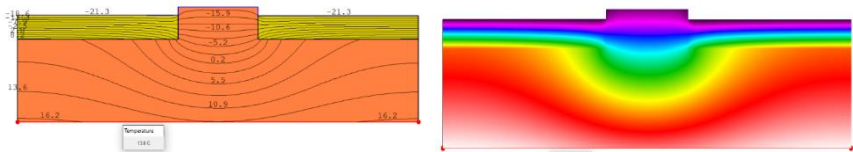
г) 17,1 °C

Рис. 11. Варіанти утеплення виступів:

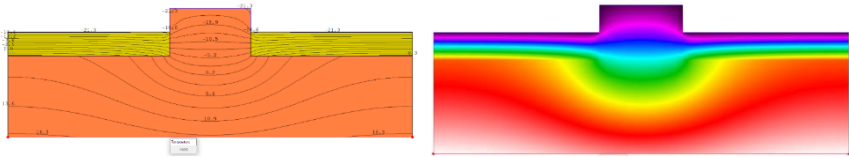
а) виступ 100 мм – торець 50 мм; б) виступ 100 мм – боки 50 мм, торець 150 мм; в) виступ 200 мм; г) 300 мм

Температура на внутрішній поверхні стіни навпроти виступу не перевищує допустимих за [4] значень.

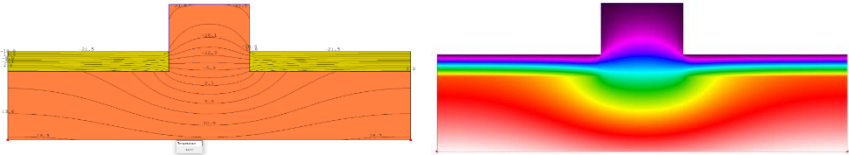
Часто при модернізації будівель подібні виступи не утеплюють. Перевіримо, до чого призведуть такі дії.



а)



б)



в)

Рис. 12. Температура на внутрішній поверхні стіни навпроти неутепленого виступу: а) довжина 200 мм; б) довжина 300 мм; в) довжина 500 мм.

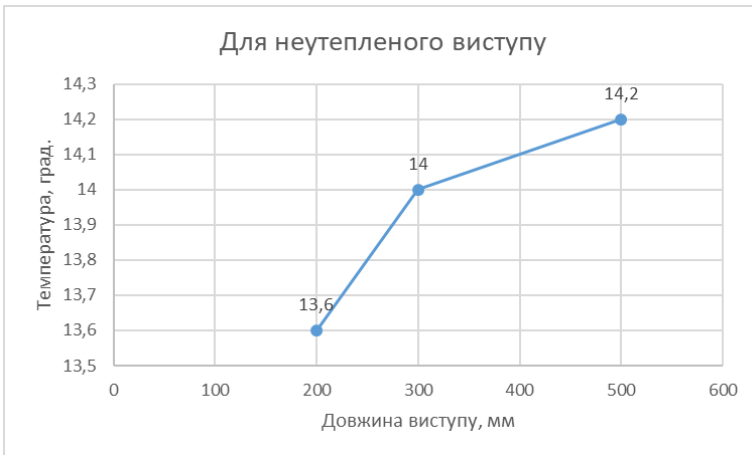
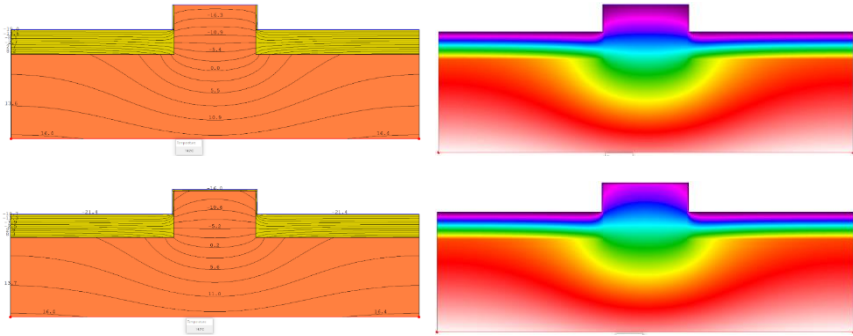


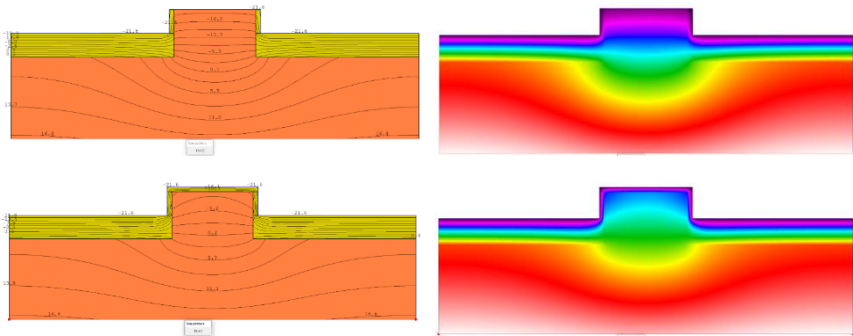
Рис. 13. Температура внутрішньої поверхні стіни

Отримані значення температур не відповідають чинним нормам.

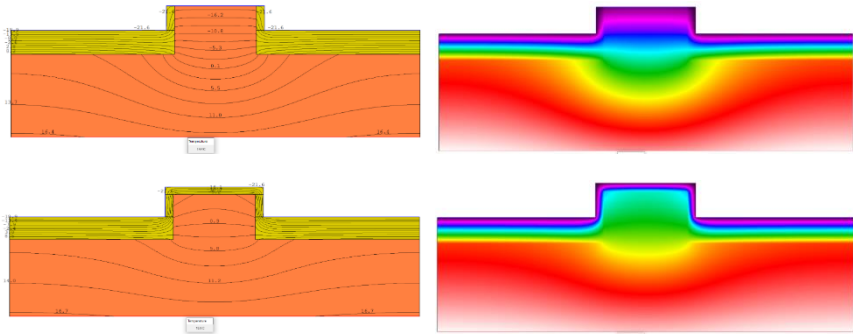
Спробуємо утеплити боковини та торець виступу для визначення мінімально необхідної товщини утеплювача. У даному розрахунку брав участь виступ довжиною 300 мм, утеплювач використовувався товщиною 10, 30, 50 мм.



а) 10мм



б) 30мм



в) 50 мм

Рис. 14. Визначення товщини утеплювача

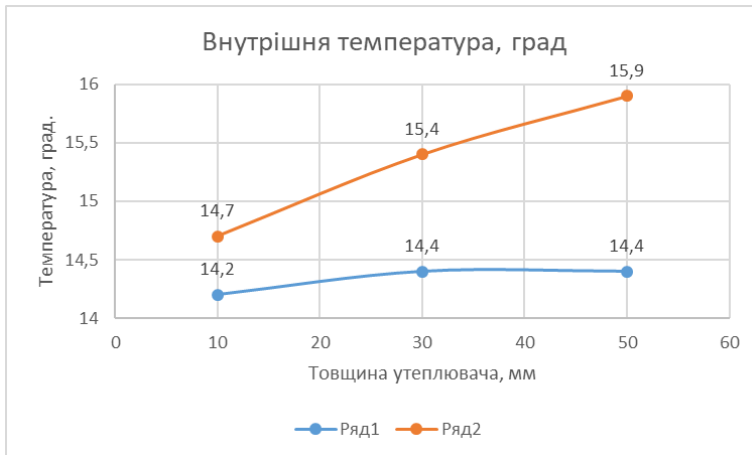


Рис. 15. Залежність температур від величини виступу
Ряд 1 – утеплені боковини, ряд 2 – утеплені боковини і торець

Висновки

1. При виконанні теплоізоляційних робіт для фасадних конструкцій необхідно враховувати, що об'єм та вартість робіт зростатимуть прямо пропорційно кількості наявних виступаючих елементів. Зокрема, для будівлі висотою 12 м, кожні додаткові 100 мм виступу зумовлюють збільшення вартості на один елемент приблизно на 6000 грн.

2. При наявності відступів до 300 мм є сенс порівнювати вартість надлишкового утеплення з вартістю зрізання / збивання виступів за умови, що вони не впливають на несучу здатність.

3. При утепленні виступів довжиною 100 мм врівень зі стіною або довжиною 100...300 мм мінеральною ватою товщиною 150 мм температура на внутрішній поверхні стіни навпроти неутепленого виступу знаходиться в межах норми.

4. При утепленні стін залишати виступи до 300 мм неутепленими недопустимо.

5. Мінімальна товщина утеплювача для реновації виступів складає 50мм.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Авторами статті публічно підтверджується, що дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. Ministerstvo enerhetyky ta vuhilnoi promyslovosti Ukrainy, «NEK «Ukrenerho», Naukovo-tehnichniyi tsentr elektroenerhetyky. Analiz efektyvnosti vykorystannia enerhoresursiv u rozvynenykh zarubiznykh krainakh i zalezhnist vid yikh importu. URL: https://ua.energy/wpcontent/uploads/2018/01/1.-Efektyvnist_energ_resursiv.pdf
2. Barzylovych D. V., Farenjuk H. H. Rozvytok systemy normatyvnykh dokumentiv Ukrainy iz zabezpechennia enerhoberezhennia ta enerhoefektyvnosti budivel // Budivelni konstruksii. – 2013. – Vyp. 77. – S. 3-9. 8.
3. Aheieva T. P. Metodychni osnovy otsinky enerhoberezhennia ta prohnozuvannia enerhospozhyvannia v sferi zhytlovoho ta komunalno-pobutovoho obsluhovuvannia naselennia Ukrainy: avtoref. dys. na здобuttia nauk. stupenia kand. tekhn. nauk. – 2002. — 20 s.
4. DBN V.2.6-31:2021 Teplova izoliatsiia ta enerhoefektyvnist budivel.
5. DSTU 9191:2022 Teploizoliatsiia budivel. Metod vyboru teploizoliatsiinoho materialu dlia uteplennia budivel.
6. DBN V.2.6-33:2018 Konstruksii zovnishnikh stin iz fasadnoi teploizoliatsiiei. Vymohy do proektuvannia.
7. R.O. Timchenko, D.A. Krishko, V.O. Savenko, V.M. Yablonska, Vykorystannia suchasnykh efektyvnykh uteplivachiv dlia pidvyshchennia enerhoefektyvnosti hromadskykh budivel. Visnyk Kryvorizkoho natsionalnogo universytetu, vyp. 54, 2022. st 153-158.
8. Piliastra
<https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%96%D0%BB%D1%8F%D1%81%D1%82%D1%80%D0%B0> .
9. Kontrfors (arkhitektura)
[https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D0%BD%D1%82%D1%80%D1%84%D0%BE%D1%80%D1%81_\(%D0%B0%D1%80%D1%85%D1%96%D1%82%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%83%D1%80%D0%B0\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D0%BD%D1%82%D1%80%D1%84%D0%BE%D1%80%D1%81_(%D0%B0%D1%80%D1%85%D1%96%D1%82%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%83%D1%80%D0%B0)) .

Література

1. Міністерство енергетики та вугільної промисловості України, «НЕК «Укренерго», Науково-технічний центр електроенергетики. Аналіз ефективності використання енергоресурсів у розвинених зарубіжних країнах і залежність від їх імпорту. URL: https://ua.energy/wpcontent/uploads/2018/01/1.-Efektyvnist_energ_resursiv.pdf
2. Барзилович Д. В., Фаренюк Г. Г. Розвиток системи нормативних документів України із забезпечення енергозбереження та енергоефективності будівель // Будівельні конструкції. – 2013. – Вип. 77. – С. 3-9. 8.
3. Агєєва Т. П. Методичні основи оцінки енергозбереження та прогнозування енергоспоживання в сфері житлового та комунально-побутового обслуговування

населення України: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук. – 2002. — 20 с.

4. ДБН В.2.6-31:2021 Теплова ізоляція та енергоефективність будівель.

5. ДСТУ 9191:2022 Теплоізоляція будівель. Метод вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель.

6. ДБН В.2.6-33:2018 Конструкції зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією. Вимоги до проектування.

7. Р.О. Тімченко, Д.А. Крішко, В.О. Савенко, В.М. Яблонська, Використання сучасних ефективних утеплювачів для підвищення енергоефективності громадських будівель. Вісник Криворізького національного університету, вип. 54, 2022. ст 153-158.

8. Пілястра

<https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%96%D0%BB%D1%8F%D1%81%D1%82%D1%80%D0%B0>.

9. Контрфорс (архітектура)

[https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D0%BD%D1%82%D1%80%D1%84%D0%BE%D1%80%D1%81_\(%D0%B0%D1%80%D1%85%D1%96%D1%82%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%83%D1%80%D0%B0\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D0%BD%D1%82%D1%80%D1%84%D0%BE%D1%80%D1%81_(%D0%B0%D1%80%D1%85%D1%96%D1%82%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%83%D1%80%D0%B0)).

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 20.05.2025	Received 20.05.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 22.05.2025	Received in revised form 22.05.2025
Прийнято.04.06.2025	Accepted 04.06.2025
Опубліковано 25.06.2025	Published 25.06.2025

O. A. Pakholiuk*

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0650-6446>
Department of Building and Civil Engineering
Lutsk National Technical University, 75 Lvivska st., Lutsk 43018, Ukraine

V. P. Samchuk

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9045-9525>
Department of Building and Civil Engineering
Lutsk National Technical University, 75 Lvivska st., Lutsk 43018, Ukraine

O. S. Chapiuk

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0283-1863>
Department of Building and Civil Engineering
Lutsk National Technical University, 75 Lvivska st., Lutsk 43018, Ukraine

V. I. Malykha

master

Department of Building and Civil Engineering
Lutsk National Technical University, 75 Lvivska st., Lutsk 43018, Ukraine

*corresponding author, e-mail: orest.pakholiuk@gmail.com

Thermal insulation of buildings with complicated facades

How to Cite:

Pakholiuk O. A., Samchuk V. P., Chapiuk O.S., Malykha V. I. (2025). Thermal insulation of buildings with complicated facades. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 23, 196-209. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-18](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-18)

Abstract. Energy efficiency measures will significantly reduce the burden on the country's energy system, especially during the heating season, as they will significantly reduce losses through the building envelope and communications. Rising tariffs are a powerful incentive for the comprehensive thermal modernization of buildings.

Energy efficiency measures not only save money but also contribute to the comfort of thermally modernized buildings. Insulation of building envelopes plays a leading role in this. First of all, these are exterior walls, roofs, and floors. When planning insulation measures, it is important to comply with current norms and standards. According to statistics, a significant number of modernized buildings use a "prefabricated system design with lightweight thin-layer plasters".

For this technology, surface evenness is important, which is not always present. Existing buildings were erected in different periods, and different technological methods and design solutions were used to give them architectural expressiveness. Insulation of such facades causes certain difficulties, and sometimes a significant increase in price due to an increase in the amount of materials or labor intensity of work when preparing the surface of structures for insulation.

There are three types of irregularities in brick facades in buildings of different "age groups":

- Curly brickwork with slight protrusions (up to 10 cm) beyond the main surface of the facade. It is most often found in Soviet-era buildings in the form of simple geometric shapes.*

- Figured brickwork is usually found in historic buildings of the last century and the century before last. A significant part of these buildings may have the status of an architectural monument. Renovation of such buildings is always individual and is beyond the scope of this study.*

- buildings (mainly public buildings) with pilasters and buttresses (pseudo-buttresses) on the facades. The third type will be the object of our research.*

Keywords: energy efficiency, insulation, insulation, pilasters, buttresses.

УДК 691.167+796.012.232

Я. І. Пиріг*

к.т.н., с.н.с., <https://orcid.org/0000-0003-0957-2251>

Кафедра технології дорожньо-будівельних матеріалів

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, Україна, 61002

С. В. Оксак

к.т.н., доцент, <https://orcid.org/0000-0002-3084-3469>

Кафедра технології дорожньо-будівельних матеріалів

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, Україна, 61002

Я. В. Ільїн

к.т.н., <https://orcid.org/0000-0003-2998-3955>

Кафедра технології дорожньо-будівельних матеріалів

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, Україна, 61002

С. О. Місніченко

аспірант, <https://orcid.org/0009-0004-1697-9249>

Кафедра технології дорожньо-будівельних матеріалів

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, Україна, 61002

*автор-кореспондент, e-mail: pirig2000@gmail.com

Особливості проектування складу литих асфальтобетонів

Цитувати як:

Пиріг Я. І., Оксак С. В., Ільїн Я. В., Місніченко С. О. (2025). Особливості проектування складу литих асфальтобетонів. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 23, 210-221. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-19](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-19)

© 2025, Пиріг Я. І., Оксак С. В., Ільїн Я. В., Місніченко С. О.

Анотація. Литі асфальтобетонні суміші та литий асфальтобетон суттєво відрізняються від традиційних гарячих сумішей та асфальтобетонів як гранулометричним складом та номенклатурою показників, які використовують для оцінки якості, так і технологією виготовлення на заводі, транспортування на дорогу та укладання в дорожнє покриття. Ці особливості литого асфальтобетону повинні враховуватися під час проектування його складу. Однією з операцій, що виконуються під час проектування складу мастичного асфальтобетону, є виготовлення зразків з подальшим встановленням фізико-механічних показників якості та порівнянням отриманих результатів з нормативними вимогами. На відміну від традиційних гарячих асфальтобетонів, проектування яких базується на показниках міцності, оптимальний вміст бітуму у складі литого асфальтобетону зазвичай визначають за показниками залишкової пористості та експлуатаційної пластичності. В статті розглянуто методику визначення оптимальної кількості бітуму з врахуванням показників експлуатаційної та технологічної пластичності.

Проектування складу здійснено на прикладі литої асфальтобетонної суміші ЛАБС-10, виготовленої на бітумі марки БНД 35/50. За отриманими даними встановлено, що оптимальна кількість бітуму становить 11 %, а температура приготування суміші - 180 - 200 °С. У разі врахування експлуатаційної пластичності литого асфальтобетону, яку визначено за показником вдавнення штампa, оптимальна кількість бітуму повинна бути зменшена до 9 %, а температуру приготування суміші необхідно підвищити до 220 - 240 °С. Виходячи з результатів оцінки технологічної пластичності, визначеної за методом Люєра, за температури 200 - 230 °С розглянута суміш є занадто жорсткою, що унеможливило її розтікання в процесі укладання в дорожнє покриття. Беручи до уваги три основні показники якості мастичного асфальтобетону, такі як залишкова пористість, експлуатаційна та технологічна пластичність, встановлено, що оптимальними параметрами приготування та укладання литої асфальтобетонної суміші ЛАБС-10 є 10 % бітуму марки БНД 35/50, та технологічні температури в інтервалі від 235 до 270 °С. Під час проектування складу литих асфальтобетонних сумішей необхідно враховувати значення технологічної пластичності, оскільки такий підхід дозволяє забезпечити технологічність конструкції дорожнього одягу та відповідність фізико-механічних показників нормованим значенням.

Ключові слова: лита асфальтобетонна суміш, підбір складу, пластичність, показники якості, вміст бітуму, метод Люєра.

Вступ

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми.

Асфальтобетон є найпоширенішим матеріалом, що використовується для влаштування покриттів сучасних автомобільних доріг в усіх країнах світу. За більш ніж півтора століття промислового застосування цього матеріалу для будівництва дорожніх покриттів розроблено певну кількість його різновидів, які суттєво різняться гранулометричним складом та видом бітумного в'язучого, за рахунок чого є можливим використовувати асфальтобетоні покриття, враховуючи різноманітні кліматичні та експлуатаційні особливості місця розташування дороги.

Литий асфальтобетон є різновидом гарячих асфальтобетонів, що значно відрізняється: гранулометричним складом (підвищена до 20 – 30 % кількість мінерального порошку, до 25 – 35 % відсіву та до 7 – 12 % високов'язкого бітумного в'язучого), номенклатурою показників, які застосовуються для оцінки його якості (замість міцнісних характеристик властивості оцінюються за показником пластичності) та технологією виготовлення, транспортування і укладання в дорожнє покриття (підвищені до 200 – 230 °С температури виготовлення сумішей на заводі; застосування для транспортування спеціалізованого транспортного засобу, обладнаного пристроями для перемішування суміші та підтримання її температури; відсутність необхідності ущільнення литої суміші після її укладання в дорожнє покриття). Вищенаведені особливості литого асфальтобетону обов'язково необхідно враховувати під час проектування його складу.

Проектування складу асфальтобетону, незалежно від його виду, складається з низки послідовно виконуваних операцій: вибір асфальтобетону та його основних характеристик (виду, типу, різновиду, групи, гранулометричного складу); виходячи з результатів попередньої операції здійснюється вибір та оцінка якості вихідних матеріалів – бітумного в'язучого, заповнювачів (щебеню, відсіву, піску), наповнювача (мінерального порошку); встановлення співвідношення між складовими мінеральними матеріалами, виходячи з їх гранулометричного складу та нормативних вимог до зернового складу асфальтобетонної суміші; визначення оптимальної кількості бітумного в'язучого; виготовлення асфальтобетонної суміші та асфальтобетонних зразків; визначення фізико-механічних показників якості виготовлених асфальтобетонних зразків, порівняння їх з нормованими вимогами діючих технічних умов та, у разі необхідності, коректування складу асфальтобетонної суміші [1]. У випадку проектування складу різних видів асфальтобетонів основна різниця полягає у номенклатурі показників, що застосовуються для оцінювання якості кінцевого продукту. Показники якості можуть бути умовно поділені на загальні, що використовуються для оцінювання асфальтобетонів різних видів (залишкова пористість, середня густина, тощо), та спеціальні, за допомогою яких є можливість оцінити властивості, що притаманні певному виду асфальтобетону (стікання бітумного в'язучого для щебеневомасикових сумішей, злежуваність для холодних асфальтобетонів та інше).

Номенклатура показників, що використовуються для оцінювання литих асфальтобетонних сумішей та литих асфальтобетонів почала складуватися в 20-х – 30-х роках минулого століття, коли європейськими та вітчизняними науковцями були розпочаті дослідження, направлені на встановлення теоретично обґрунтованих складів литих сумішей та пошуку ефективних методів оцінки їх якості. Перші методи оцінювання якості литого асфальтобетону були перенесені з відповідних специфікацій, які нормували оцінювання якості гарячого асфальтобетону [2]. На той час для оцінювання показників якості литих асфальтобетонних сумішей та асфальтобетонів застосовували головним чином традиційні показники якості, такі як пористість, коротко- та довготривале водонасичення, міцність на стиск за температури 20 °C і 50 °C, міцність на розтяг. Крім того було запропоновано декілька випробувань, направлених на оцінювання специфічних характеристик литих асфальтобетонів (проба шаром, міцність на вигин балки, визначення деформації під час розтягу, визначення опору стирпанню, вдавлювання штампу та інше) [2].

В подальшому було встановлено, що деякі з показників характеризують властивості литих асфальтобетонів лише частково, а інші зовсім не придатні для оцінювання якості цього різновиду асфальтобетонів. Так, наприклад, завдяки підвищеній пластичності часто не можливо визначити значення міцності на стиск, особливо за підвищених температур

(+ 50 °C), оскільки є відсутнім чітко виражений максимум руйнуючого навантаження. Це ж саме стосується і міцності на розтяг, оскільки через пластичність матеріалу ні значення міцності на розтяг, ні величина подовження литого асфальтобетону під час його розтягу не може бути критерієм схильності бетону до розтріскування. Саме тому міцнісні показники можуть використовуватися лише як додаткові показники, які опосередковано характеризують пластичність литого асфальтобетону.

В силу свого складу (підвищеній кількості бітуму та мінерального порошку) не придатними або малоінформативними для оцінювання властивостей литих асфальтобетонів є показники водопоглинання, водопроникності, набрякання у воді та залишкової пористості.

Зараз в дорожніх галузях європейських країн, в тому числі і України, найбільш поширеним та інформативним показником якості литих асфальтобетонів є експлуатаційна пластичність, що визначається як глибина вдавлювання штампів площею 5 см² за температури 40 °C після 30 хв дії навантаги.

Дещо іншим, порівняно з традиційними гарячими асфальтобетонами, є підхід до визначення оптимальної кількості бітумного в'язучого у складі литого асфальтобетону. Для гарячих асфальтобетонів за оптимальну приймається така кількість бітумного в'язучого, що відповідає найбільшій міцності при оптимальній щільності – зазвичай кількість бітуму визначається шляхом побудови залежності одного з фізико-механічних показників якості (наприклад, міцність на стиск за температури 20 °C або 50 °C) від концентрації бітумного в'язучого, при цьому за оптимальне приймається значення бітуму, яке відповідає екстремальному значенню міцності [2].

В литому асфальтобетоні у випадку зміни концентрації бітумного в'язучого відсутні екстремальні (пікові) значення будь-якого зі стандартних показників якості – щільності, міцності на стиск, глибини вдавлювання штампів. Для литого асфальтобетону оптимальний вміст бітуму визначається за критерієм належної пластичності (рухомості) литої суміші, яка забезпечує її зручнукладальність та щільність без додаткового ущільнення. Виходячи з цього найбільш вагомим показником якості литих асфальтобетонних сумішей та литих асфальтобетонів за яким необхідно здійснювати проектування складу суміші та вибір технологічних параметрів приготування і укладання в дорожнє покриття є пластичність суміші.

В даний час, згідно проєкту ДСТУ 9290-6:202X «Суміші асфальтобетонні та асфальтобетон. Технічні умови. Частина 6. Литі суміші» встановлення оптимального вмісту бітумного в'язучого в складі литих асфальтобетонних сумішей здійснюється за показниками глибини вдавлювання штампів (повинна наближатися до середнього нормативного значення, що дорівнює 2,2 мм) та залишкової пористості (повинна відповідати встановленим ДСТУ вимогам, тобто не перевищувати 2 %). В

той же час не враховується технологічна пластичність литої асфальтобетонної суміші, оптимальне значення якої може бути досягнуто шляхами регулювання кількості бітумного в'язучого в суміші або технологічної температури суміші. Визначення технологічної пластичності може здійснюватися різними методами [3], [4], [5], при цьому, зазвичай, отримувані результати є близькими.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є встановлення доцільності врахування показника технологічної пластичності під час розрахунку оптимального складу литого асфальтобетону. Для досягнення поставленої мети було здійснено підбір складу литих асфальтобетонних сумішей з врахуванням показників технологічної та експлуатаційної пластичності, з встановленням оптимальних кількостей бітумних в'язучих.

Матеріали та методи

В якості об'єкту дослідження було прийнято литу асфальтобетонну суміш ЛАБС-10, гранулометричний склад якої відповідає вимогам, представленим в проєкті ДСТУ 9290-6:202X «Суміші асфальтобетонні та асфальтобетон. Технічні умови. Частина 6. Литі суміші». Для виготовлення литої суміші застосовували бітум БНД 35/50 в кількості 9 – 11 %, що мав наступні характеристики: penetрація за 25 °C – $41 \times 0,1$ мм, температура розм'якшеності – 52,2 °C, температура крижкості по Фраасу – мінус 11 °C.

Визначення технологічної пластичності здійснено з використанням методу Люєра (показник плинності Люєра) [5], зовнішній вигляд якого представлено на рис. 1, за методикою, наведеною в МР В.2.7-37641918-951 [6]. Технологічна пластичність визначалась в діапазоні температур від 160 °C до 260 °C.

Вибір методу Люєра пояснюється тим, що його використання під час будівництва дорожніх та мостових покриттів для оцінювання технологічної пластичності суміші, встановлення оптимальної кількості бітуму та призначення необхідної технологічної температури укладання литих асфальтобетонних сумішей на даний час є поширеною практикою в різних країнах світу [7] – [12].

Результати та обговорення

Визначення оптимальної кількості бітуму в складі литого асфальтобетону здійснено згідно методики, представленої в проєкті ДСТУ 9290-6:202X «Суміші асфальтобетонні та асфальтобетон. Технічні умови. Частина 6. Литі суміші». Для цього були виготовлені литі асфальтобетонні суміші з різною кількістю бітуму за різної технологічної температури.



Рис. 1. Зовнішній вигляд обладнання, що застосовувалася для визначення технологічної пластичності литої суміші методом Люєра

Згідно з отриманими даними, представленими на рис. 2, зі збільшенням кількості бітуму в складі литої суміші з 9% до 11% та зі збільшенням технологічної температури приготування суміші спостерігається зменшення залишкової пористості литого асфальтобетону. За показником залишкової пористості незалежно від кількості бітуму в складі суміші та температури її приготування майже всі отримані дані відповідають нормам, представленим в проєкті ДСТУ 9290-6. Виключенням є лише литі суміші з 9% бітуму, виготовлені за температурами меншими ніж 220°C.

Виходячи з умови забезпечення нормативних значень залишкової пористості суміші та найнижчої температури її приготування найбільш прийнятною є лита асфальтобетонна суміш з 11 бітуму, виготовлена за технологічними температурами 180 – 200°C. У випадку врахування експлуатаційної пластичності, оціненої за показником вдавлювання штампю за температури 40 °C (рис. 3), найбільш придатними є литі суміші з 9% бітуму, виготовлені за технологічних температур 210 – 240°C. Приймаючи до уваги, що литі суміші з 9 % бітуму, виготовлені за температури нижче ніж 220°C не відповідають нормативним значенням залишкової пористості, доцільно підвищити температури виготовлення сумішей до 220 – 240°C.

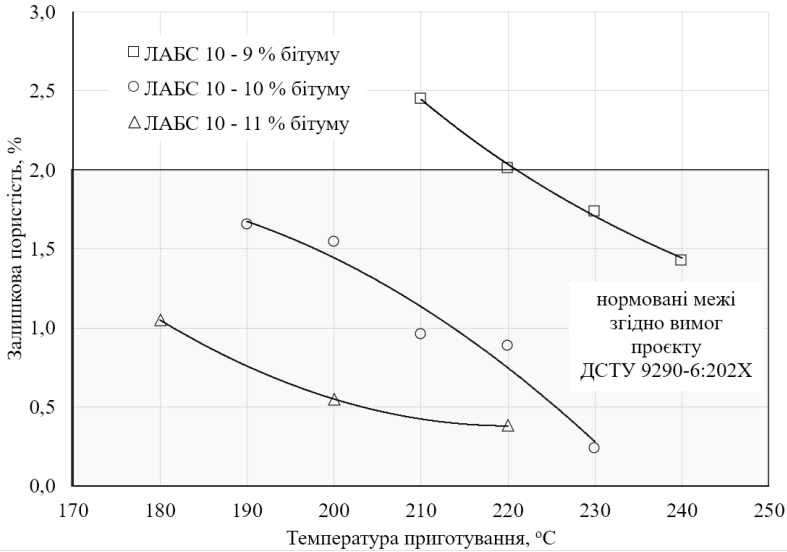


Рис. 2. Залежності залишкової пористості литого асфальтобетону ЛАБ-10 від кількості бітуму в його складі та температури приготування суміші

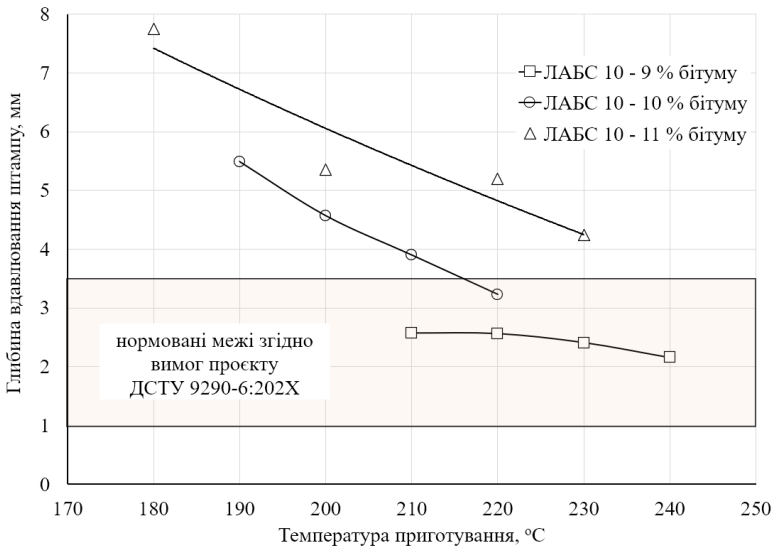


Рис. 3. Залежності глибини вдавлювання штамп за 40 °C для литого асфальтобетону ЛАБ-10 від кількості бітуму в його складі та температури приготування суміші

Згідно з методикою підбору складу литої асфальтобетонної суміші, представленою в проєкті ДСТУ 9290-6:202X «Суміші асфальтобетонні та асфальтобетон. Технічні умови. Частина 6. Литі суміші», для прийнятого гранулометричного складу литого асфальтобетону ЛАБ-10 оптимальною є кількість бітуму 9%, а технологічні температури приготування та укладання суміші знаходяться в межах 220 – 240°C. Однак, оскільки влаштування шару дорожнього одягу з литої асфальтобетонної суміші не передбачає її ущільнення, суміш повинна характеризуватися достатньою пластичністю, яка забезпечить розподілення матеріалу під власною вагою шаром заданої товщини. Згідно представлених на рис. 4 результатів, технологічна пластичність підвищується зі збільшенням кількості бітуму в суміші та зі зростанням технологічної температури її приготування. Повністю відповідає умовам оптимальної технологічної пластичності лита асфальтобетонна суміш з 11% бітуму, виготовлена за технологічних температур 200 – 230°C. В той же час оптимальна пластичність суміші з 9 % бітуму може бути досягнута за температур, які перевищують 27°C, що є недоцільним оскільки за цих температур за рахунок інтенсивного старіння бітуму буде спостерігатися погіршення якості та довговічності асфальтобетону. За температур 200 – 230°C лита суміш буде надто жорсткою, що унеможливить її розтікання в процесі укладання в дорожнє покриття.

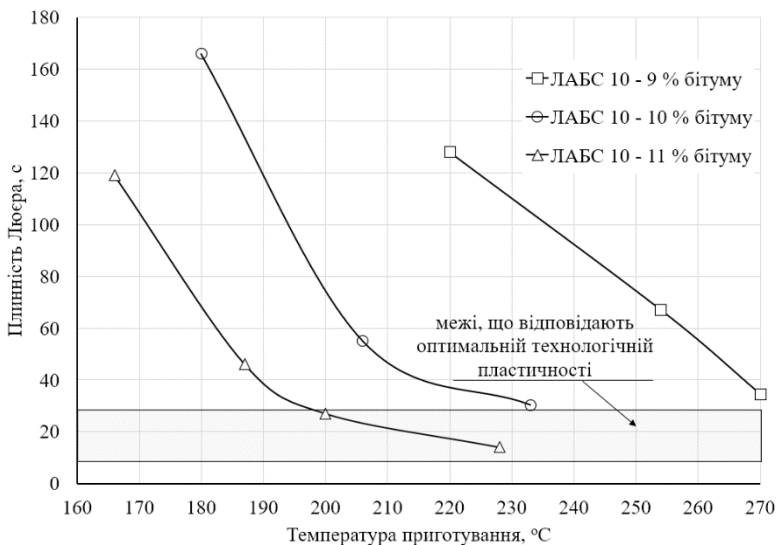


Рис. 4. Залежності технологічної пластичності литої суміші ЛАБС-10 від кількості бітуму в її складі та температури приготування

Враховуючи три основні показники якості литого асфальтобетону, такі як залишкова пористість, експлуатаційна пластичність (показник вдавлювання штампю за температури 40 °С) та технологічна пластичність (показник плинності Люєра), доцільним до використання можна вважати литу асфальтобетонну суміш з 10 % бітуму БНД 35/50, виготовлену в температурному діапазоні від 235 до 270°С (рис. 4). Саме такий склад забезпечить необхідну рухомість литої суміші під час її укладання в дорожнє покриття та відповідність фізико-механічних показників якості значенням, нормованим у проєкті ДСТУ 9290-6:202X «Суміші асфальтобетонні та асфальтобетон. Технічні умови. Частина 6. Литі суміші».

Висновки

Під час проєктування складу литих асфальтобетонних сумішей, що передбачає визначення оптимальної кількості бітумного в'язучого та встановлення раціональних технологічних температур приготування та укладання в покриття сумішей, необхідно одночасно враховувати значення технологічної пластичності, визначеної одним з поширених методів, та експлуатаційної пластичності, визначеної методом вдавлювання штампю. Саме такий підхід дозволяє забезпечувати технологічність влаштування шарів дорожнього одягу з литих асфальтобетонних сумішей та відповідність фізико-механічних показників литого асфальтобетону нормованим значенням.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. Vyprobuvannia dorozhno-budivelnnykh materialiv. Laboratornyi praktykum: Navchalnyi posibnyk. (2006). Kharkiv: KhNADU. 350.
2. Staritzky M. (1934). Gussasphalt. Berlin, 112.
3. Pyrih Ya.I., Oksak S.V., Ilin Ya.I., Misnichenko S.O. (2024). Review of the

method for determining the fluidity of the mastic mixture based on the established immersion depth of the test rod. Roads and bridges, Issue 30, 203-213. <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.30.203>

4. Pyrih Ya.I., Oksak S.V., Ilin Ya.I., Misnichenko S.O. (2024). Determination of plasticity of the mastic asphalt mixture by torque value. Modern technologies and methods of calculations in construction, Volume 22, 172-181. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-12\(22\)-17](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-12(22)-17)

5. Pyrih Ya.I., Oksak S.V., Ilin Ya.I., Misnichenko S.O. (2024). Determination of plasticity of mastic asphalt mixtures by the Luer method. Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University, Volume 106, 85-91. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2024.106.0.85>

6. MR V.2.7-37641918-951:2025 «Metodychni rekomendatsii z vyznachennia pokaznyka plastychnosti (rukhomosti) lytykh asfaltobetonnykh sumishei». Ahentstvo vidnovlennia. 2025. 33 c.

7. Guilian Z., Xiaoning Z., Wu C. (2015). Evaluation of steel bridge deck MA mixture properties during construction. Journal of Marine Science and Technology, T.. 23. № 3, 293-301. <https://doi.org/10.6119/JMST-014-0327-2>

8. Qian J. et al. (2013). Fatigue performance of Gussasphalt concrete made from modified AH-70# asphalt. Materials & Design, T. 52, 686-692. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.06.009>

9. Jang Y.D., Park T.S., Lee J.S. (2019). A study on the performance improvement of gussasphalt mixture. Journal of the Korean Asphalt Institute. T. 9. №. 2. P. 176-193. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135557>

10. Chen J.S. et al. (2011). Fundamental characterization of engineering properties of gussasphalt mixtures. Journal of Materials in Civil Engineering, T.. 23, № 12, 1719-1726. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000339](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000339)

11. Lee G.H., Lee G.H. (2000). Laboratory Investigation into Mix Design Procedure and Criteria of Guss Asphalt. Korean Society of Road Engineers, № 11a, 69-73.

12. Luo S. et al. (2017). Design of gussasphalt mixtures based on performance of gussasphalt binders, mastics, and mixtures. Construction and Building Materials, T. 156, 131-141. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.171>

Література

1. Випробування дорожньо-будівельних матеріалів. Лабораторний практикум: Навчальний посібник (2006). Харків: ХНАДУ. 350 с.

2. Staritzky M. (1934). Gussasphalt. Berlin. 112 p.

3. Пиріг Я.І., Оксак С.В., Ільїн Я.І., Місніченко С.О. (2024). Огляд методу визначення пластичності литої асфальтобетонної суміші, який базується на встановленні глибини занурювання випробувального стрижня. *Дороги і мости*. Вип. 30. С. 203-213. <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.30.203>

4. Пиріг Я.І., Оксак С.В., Ільїн Я.І., Місніченко С.О. (2024). Визначення пластичності литої асфальтобетонної суміші за значенням крутного моменту. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. Збірник наукових праць*. Вип. 22. С. 172-181. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-12\(22\)-17](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-12(22)-17)

5. Пиріг Я.І., Оксак С.В., Ільїн Я.І., Місніченко С.О. (2024). Визначення пластичності литих асфальтобетонних сумішей методом Люєра. *Вісник ХНАДУ*. Вип. 106. С. 85-91. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2024.106.0.85>

6. МР В.2.7-37641918-951:2025 «Методичні рекомендації з визначення показника пластичності (рухомості) литих асфальтобетонних сумішей». Агентство відновлення. 2025. 33 с.

7. Guilian Z., Xiaoning Z., Wu C. (2015). Evaluation of steel bridge deck MA mixture properties during construction. *Journal of Marine Science and Technology*, Т. 23. № 3, 293-301. <https://doi.org/10.6119/JMST-014-0327-2>

8. Qian J. et al. (2013). Fatigue performance of Gussasphalt concrete made from modified AH-70# asphalt. *Materials & Design*, Т. 52, 686-692. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.06.009>

9. Jang Y.D., Park T.S., Lee J.S. (2019). A study on the performance improvement of gussasphalt mixture. *Journal of the Korean Asphalt Institute*. Т. 9. №. 2. P. 176-193. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135557>

10. Chen J.S. et al. (2011). Fundamental characterization of engineering properties of gussasphalt mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Т. 23, № 12, 1719-1726. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000339](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000339)

11. Lee G.H., Lee G.H. (2000). Laboratory Investigation into Mix Design Procedure and Criteria of Guss Asphalt. *Korean Society of Road Engineers*, № 11a, 69-73.

12. Luo S. et al. (2017). Design of gussasphalt mixtures based on performance of gussasphalt binders, mastics, and mixtures. *Construction and Building Materials*, Т. 156, 131-141. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.171>

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 24.04.2025	Received 24.04.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 23.05.2025	Received in revised form 23.05.2025
Прийнято 01.06.2025	Accepted 01.06.2025
Опубліковано 25.06.2025	Published 25.06.2025

Y. I. Pyrig *

Ph.D. in Engineering, S. Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-0957-2251>

Department of technology of Road road-construction materials

Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, Ukraine, 61002

S. V. Oksak

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0002-3084-3469>

Department of technology of Road road-construction materials

Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, Ukraine, 61002

I. V. Iliyn

Ph.D. in Engineering, <https://orcid.org/0000-0003-2998-3955>

Department of technology of Road road-construction materials

Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, Ukraine, 61002

S. O. Misnichenko

Postgraduate student, <https://orcid.org/0009-0004-1697-9249>

Department of technology of Road road-construction materials

Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, Ukraine, 61002

*corresponding author, e-mail: pirig2000@gmail.com

Design features of the mastic asphalt composition

How to Cite:

Pyryg Y. I., Oksak S. V., Iliyn I. V., Misnichenko S. O. (2025). Design features of the mastic asphalt composition. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 23, 210-221. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-19](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-19)

Abstract. Mastic asphalt concrete is a type of hot asphalt concrete that differs significantly from hot asphalt concrete in terms of particle size distribution, nomenclature of indicators used to assess quality, and technology for manufacturing, transporting, and paving. These features of mastic asphalt concrete must be taken into account when designing its composition. One of the operations performed during the design of a mastic asphalt concrete composition is the manufacture of samples, with the subsequent establishment of physical and mechanical quality indicators and comparison of the results with regulatory requirements. Unlike traditional hot asphalt concrete, the design of which (in particular, the determination of the amount of bitumen) is based on strength indicators (compressive strength at 50 °C and 20 °C), the optimal bitumen content in the composition of mastic asphalt concrete according to the requirements of the national standard DSTU 9290-6 is determined by the residual porosity and operational plasticity (stamp indentation). In the presented work, the optimal content of bitumen of the BND 35/50 brand in the composition of a mastic asphalt mix of the LABS-10 type was selected. According to the data obtained, it was found that the optimal amount of bitumen is 11 %, and the temperature of preparation of the mixture is 180 - 200 °C. In the case of taking into account the serviceability of mastic asphalt concrete, determined by the stamp indentation index, the optimal amount of bitumen is reduced to 9 %, and the mixture preparation temperature is increased to 220 - 240 °C. Based on the results of the assessment of technological plasticity determined by the Luer method, at a temperature of 200 - 230 °C, the mastic-in-place mixture used in the work will be too stiff, which will make it impossible for it to spread during the process of laying on the road surface. Taking into account the three main quality indicators of mastic asphalt concrete, such as residual porosity, operational and technological plasticity, it is advisable to use a mastic asphalt concrete mixture with 10 % BND 35/50 bitumen produced in the temperature range from 235 to 270 °C. When designing the composition of mastic asphalt mixtures, it is necessary to take into account the value of technological plasticity, since this approach allows ensuring the manufacturability of pavement construction and compliance of physical and mechanical parameters with the standardized values.

Keywords: mastic asphalt mix, composition selection, fluidity, quality indicators, bitumen content, Luer method.

УДК 721.02

С. І. Пустюльга

д.т.н., професор, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7623-7803>

Кафедра архітектури та дизайну

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

В. П. Самчук*

к.т.н., доцент, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9045-9525>

Кафедра будівництва та цивільної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

Ю. С. Бондарчук

к.мист., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1890-9795>

Кафедра архітектури та дизайну

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

М. В. Заразка

аспірант, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7652-5563>

Кафедра архітектури та дизайну

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

*автор-кореспондент, e-mail: volodsam@ukr.net

Параметризм як стиль в архітектурі та дизайні: концепція, методологія, комп'ютерний інструментарій та перспективи розвитку

Цитувати як:

Пустюльга, С. І., Самчук, В. П., Бондарчук Ю. С., Заразка, М. В. (2025). Параметризм як стиль в архітектурі та дизайні: концепція, методологія, комп'ютерний інструментарій та перспективи розвитку. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві, 23, 222-239. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-20](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-20)

© 2025, Пустюльга, С. І., Самчук, В. П., Бондарчук Ю. С., Заразка, М. В.

Анотація. У роботі досліджено взаємозв'язок тріади основних методологічних засад параметризму, як сучасного стилю в дизайні, окреслено ряд нових перспектив для розвитку параметричного стилю.

Визначено концепцію стилю параметрики. Концепція подана архітектурно-дизайнерською системою, у якій всі елементи та комплекси є гнучкими і підпорядковуються параметричній логіці. Основним інструментом для досягнення такої логічної гнучкості є алгоритмізація функціональних зв'язків між множиною параметрів всіх окремих складових процесу дизайн-проекування. Методологія стилю параметризму сформована за принципом побудови природних систем, у яких форми є результатом взаємодії факторів, що організовують складні та ніби розрізнені елементи у цілісну структуру.

Проведено аналіз найбільш популярних комп'ютерних програм стосовно можливостей параметричного моделювання 3D-об'єктів. На основі аналізу здійснено класифікацію програм за ефективністю їх застосування як інструментів

формування параметричного стилю в різних галузях дизайну.

До перспективних напрямів розвитку параметричного стилю в дизайні було віднесено наступні складові: застосування генеративного дизайну на основі ШІ; біонічний та адаптивний дизайн; інтеграція параметричного дизайну в створення динамічних віртуальних середовищ AR/VR; роботизоване та цифрове виробництво; активне впровадження клімат-орієнтованого дизайну. Їх розвиток відкриє нові можливості для стилю параметрики за рахунок перенесення проєктованих об'єктів у віртуальний простір, цифрової симуляції впливу параметрів розробки на якісні характеристики дизайнерських рішень.

Особлива увага приділена дискретно-воксельному параметричному дизайну як новому підходу до параметричного моделювання. Його основна ідея полягає у тому, що складні форми описуються не традиційними параметричними кривими чи поверхнями, а дискретними елементами – вокселями. Завдяки такому представленню об'єктів кожен воксель може нести окремий набір параметрів, що забезпечує більш детальне і гнучке моделювання складних та адаптивних структур у будь-якій галузі дизайн-проєктування.

Ключові слова: параметричний стиль, концептуальні засади, методологія параметричного проєктування, комп'ютерний інструментарій, дискретно-воксельний параметричний дизайн, генеративний дизайн.

Вступ

Параметризм бере свій початок у цифрових методах анімації, що з'явилися в середині 1990-х років. Однак, повною мірою він розкрився лише в останні роки завдяки розвитку передових параметричних дизайнерських систем, які дозволяють створювати складні, динамічні форми [1]. Сьогодні параметризм визначає нову парадигму, яка базується на складних обчислювальних методах, багатому формалізованому різноманітті елементів та логіці і виокремився у провідний напрям сучасних архітектури та дизайну.

У процесі свого розвитку параметризм став повністю сформованим стилем. Історично, особливий стиль параметризму виник у результаті кризи модернізму та наступного періоду невизначеності, який ознаменувався такими короточасними стилями, як постмодернізм, деконструктивізм і мінімалізм [2]. Параметризм заповнив цю прогалину, запропонувавши новий принцип структурування об'єктів архітектури і дизайну через властивість їх динамічної гнучкості. А сучасні параметричні інструменти та скрипти відкрили шлях для формулювання та впровадження складних зв'язків між окремими елементами систем у процесі проєктування.

Поняття стилю не слід плутати із тимчасовими модними тенденціями. Стиль є глибоким історичним явищем, яке відображає єдність та різноманітність архітектурних епох, до яких можна віднести готику, ренесанс, бароко, класицизм, історизм і модернізм. Історія розвитку архітектури та дизайну вимагає переосмислення концепції стилю як узагальненого поняття, що не тільки описує минуле, але й формує майбутнє.

Тому побудова цілісної тріади, в яку включені: концептуальні засади парметризму як стилю, методологічні прийоми застосування параметричного дизайну та ефективний комп'ютерний інструментарій для ефективного створення об'єктів параметрики є актуальним завданням, що пов'язане із інноваційними методами в галузі архітектури та дизайну і може відкрити нові перспективи для розвитку парметризму як стилю.

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Відомо ряд наукових публікацій, присвячених проблематиці параметричного проектування, зокрема у сферах архітектури, мистецтва та дизайну. Пошук та аналіз літературних джерел стосовно параметрики як стилю був здійснений за наступними напрямками: відомі підходи до формування концепції та методологічних принципів побудови параметричного стилю, сучасний програмний інструментарій для створення об'єктів параметричного дизайну, аналіз перспективних напрямів розвитку параметричного стилю в дизайні, дискретний параметричний дизайн, як незалежна гілка параметричного стилю.

Дослідження [3] присвячене вивченню взаємодії різних рівнів розробки об'єктів у параметричному дизайні, включаючи користувацькі інтерфейси та методи моделювання. Запропоновано оригінальні підходи для покращення взаємодії між творчими ідеями дизайнерів та параметричними моделями об'єктів дизайн-проектування. Однак, у роботі відсутні концептуальні стратегії, методологія щодо зв'язування в єдине ціле класичного дизайнерського підходу, параметрики та ефективного комп'ютерного інструментарію у процесі проектування.

У статті [4] автор аналізує зв'язок між параметричним дизайном, цифровим виробництвом і виготовленням об'єктів. Досліджено, як ці цифрові технології можуть спільно сприяти розвитку архітектури. Визначені переваги інтегрування параметричних моделей із цифровими методами виробництва. Питання методологічної основи параметричного підходу, аналізу інструментарію для вирішення проблем алгоритмічного виробництва залишилися у роботі без уваги.

Роботи [5-7] представляють парметризм як новий глобальний стиль в архітектурі та урбаністичному дизайні. Вперше у роботах було започатковано обговорення теоретичних основ параметрики та практичні застосування параметричного підходу в архітектурі та дизайні. Окреслено методологічні рамки та естетичні принципи парметризму. Однак, у наведених дослідженнях не були пов'язані методичні підходи до застосування параметричного методу із можливостями сучасного комп'ютерного інструментарію, не обґрунтована концепція застосування і впливу парметризму на технологію проектування та виготовлення сучасних виробів, її значення для соціального розвитку та екологічної якості об'єктів дизайну.

У роботі [8] розглянуто проблеми інтеграції конструктивних особливостей та матеріалів у процеси параметричного проектування. Досліджуються підходи до використання властивостей матеріалів об'єктів як активних параметрів у дизайн-проектуванні. Акцентується увага на важливості інформативності врахування характерних особливостей матеріалів для досягнення інноваційних архітектурних рішень. Однак, у роботі не розглядаються концептуальні принципи параметричного проектування як стилю, де крім властивостей матеріалів можна враховувати множину інших визначальних параметрів об'єктів будівництва (технологічних, ергономічних, економічних та інших).

У статті [9] досліджено основні історичні етапи формування поняття «параметрика» в галузі архітектури та дизайну, починаючи з інтуїтивного розглядання форм, як сукупності математичних та фізичних моделей. Визначено етапи розвитку параметричної архітектури та її відмінність від традиційних підходів. Проаналізовано ряд спеціалізованих програм, які можна застосовувати при проектуванні об'єктів параметричної архітектури. Виявлено, що параметричне проектування є перспективним і прогресивним методом архітектурної практики. Однак, параметрична архітектура не розглядається як цілісний концептуальний стиль зі своєю методологічною парадигмою та ефективним вибором комп'ютерно-обчислювального інструментарію. Відсутні спроби його інтеграції з іншими технологіями проектування.

У роботі [10] представлено результати аналізу основних етапів становлення та історія розвитку параметричного дизайну, як інноваційного методу проектування об'єктів архітектури та промислового виробництва. Визначено рівень універсальності та адаптивності методологічної основи алгоритмічного моделювання дизайн-об'єктів. Це дало можливість авторам виокремити критерії оцінки переваг та недоліків параметричного дизайну як методу проектування. Окреслено шляхи подальшого розвитку параметричного дизайну у напрямках дискретного представлення алгоритмів формування об'єктів і їх візуалізації за допомогою піксельно-воксельного інструментарію. Невирішеними у роботі залишилися побудова концепції дискретно-воксельного дизайну, як окремого відгалуження параметричного стилю зі своєю методологією та комп'ютерною реалізацією.

Проведений аналіз джерел вказав на ряд невирішених проблем, розв'язання яких може стати основою для формулювання мети даної роботи, а відповідно – завдання досліджень.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є: дослідження концептуальних принципів, методологічної основи та програмного інструментарію параметричного дизайну, як взаємопов'язаної тріади вже сформованого стилю. На основі досліджень окреслити найбільш перспективні та інноваційні напрями розвитку параметрики в дизайні та архітектурі.

Для досягнення поставленої мети слід вирішити наступні завдання:

1. Охарактеризувати концептуальні принципи параметричного стилю в дизайні. Дослідити його методологічну основу.
2. Виконати критичний аналіз переваг та недоліків програмного інструментарію для створення об'єктів параметричного дизайну.
3. Окреслити перспективні напрями розвитку параметричного стилю в дизайні.
4. Розробити концептуальні принципи нового відгалуження параметрики, під назвою дискретно-воксельний параметричний дизайн.

Результати та обговорення

Популярні стилі сучасного дизайну можна порівняти з новими науковими парадигмами, які створюють концептуальні основи галузі, визначають нові цілі, методи та цінності [5]. Вони задають напрям для колективної роботи в дослідницькому полі дизайну. З цього випливає, що стилі – це не просто естетичні течії, а цілісні програми дизайнерських досліджень.

Розвиток дизайну відбувається через інновації всередині певного стилю, чергуючи періоди поступового прогресу стилю із переходами до іншого стилю. Стилі є ніби циклами інновацій, які об'єднують індивідуальні дослідження дизайнерів. Для такого розвитку необхідно зберігати цілісність стилю, навіть коли, це викликає певні труднощі. Принципи і методологія стилю мають бути послідовно підтримувані, щоб дати йому шанс на довготривалий успіх. Отже, стиль – це глибоко вкорінена система і з чіткими принципами та підходами до вирішення дизайнерських завдань. Кожен стиль повинен мати своє унікальне ядро і характерні проєктні та візуальні особливості.

Концепцію стилю параметрики можна визначити, як архітектурно-дизайнерську систему, у якій всі елементи та комплекси є гнучкими і підпорядковуються параметричній логіці. Це означає, що всі використовувані у процесі творчих пошуків форми мають адаптивну природу, яка дозволяє створювати взаємопов'язані системи, що здатні відповідати на складні соціальні та функціональні потреби.

Параметричний стиль пропонує радикальну трансформацію основних принципів архітектурного дизайну. Замість традиційного підходу, який базується на використанні чітких геометричних форм, таких як прямі лінії, прямокутники, куби, циліндри, піраміди та сфери, – у цьому стилі, акцент робиться на живих, адаптивних та динамічних геометричних об'єктах. Серед них – сплайни, фрактали, вигнуті поверхні, креативні форми та складні тривимірні структури, які імітують природні системи, наприклад: «хмари», «краплі», «рослини», «тканинні матеріали» і т. д.

Наведені вище елементи реагують на вплив зовнішніх факторів (атракторів) та гармонійно взаємодіють між собою.

У параметризмі кожна властива характеристика для елементів чи їх сукупностей підпорядковується параметричним алгоритмам, що дозволяє гнучко змінювати їхні властивості. Основним інструментом для досягнення цієї гнучкості є алгоритмізація функціональних зв'язків між множиною параметрів всіх окремих складових дизайн-проекування.

Однак, новий стиль не зводиться лише до використання сучасних комп'ютерних технологій чи обчислювальних інструментів. Стиль параметрики пропонує нову концепцію, засновану на інноваційних методах і цілях як у формі, так і в змісті та функціях.

Практика використання методів параметризму дає можливість окреслити негативні підходи до параметричного дизайну, що запобігає повторенню невдалих або несумісних рішень. До таких невдалих рішень можна віднести: використання в процесі проєкування простих геометричних примітивів, таких як площини, прості багатокутники, круги і т. і., надмірне застосування одноманітного повторення складових елементів без їх варіацій, хаотичне поєднання незалежних елементів або систем, які не мають внутрішнього взаємозв'язку. Разом із тим, практика визначила основні принципи розвитку параметричного стилю: усі форми мають бути параметрично адаптивними, змінюватися залежно від зовнішніх або внутрішніх параметрів; поступово диференціюватися відповідно до контекстуальних норм; а елементи та системи – бути логічно зв'язаними, перебувати у взаємній кореляції та мати можливість для інтеграції.

Методологія застосування стилю параметризму базується на вище наведених методологічних правилах, які допомагають уникати непродуктивних напрямів проєкування і підтримують інновації у розвитку позитивних властивостей напрямку параметризму. Аналіз негативної евристики дозволяє критично оцінювати та уникати повторення помилок минулих стилів, а позитивна – забезпечує основу для систематичного розвитку та реалізації ідей, які відповідають концепції стилю параметризму. Методологія стилю параметризму повинна сформувати свою, унікальну мову сучасного дизайну, спрямовуючи творчість у русло, що відповідає його ключовим цілям: гармонійна взаємодія, адаптивність та інноваційність.

Композиції, із використанням параметризму, відображають принципи природних систем, у яких форми є результатом взаємодії факторів, що організовують складні та ніби розрізнені елементи у цілісну структуру. Таким чином, цей стиль відображає не лише візуальний, технологічний, а й концептуальний прорив у сучасному дизайні.

Еволюція параметризму нерозривно пов'язана із безперервним удосконаленням комп'ютерних технологій проєкування. Вони відкривають перед дизайнерами унікальні творчі й організаційні можливості,

дозволяючи реалізовувати складні концепції. Параметризм як стиль можливий лише за умов використання передових параметричних методів, які стали невід'ємною частиною сучасної архітектури та креативного дизайну.

До передових підходів параметричного моделювання належать використання середовищ: Rhinoceros 3D (Rhino) + Grasshopper, Autodesk Revit + Dynamo, Blender + Sverchok, Houdini, SolidWorks, Maya, SketchUp з відповідними плагінами (Parametric Tools, FlexTools). Використання цих програмних комплексів стає звичною практикою серед креативних дизайнерів та архітекторів. У сучасному дизайні з елементами параметричного стилю конкурентоспроможність фахівця значною мірою залежить від володіння цими інструментами.

У подальшому проаналізовано переваги та недоліки зазначених програмних середовищ щодо їхньої ефективності у реалізації параметричного дизайну.

Rhinoceros 3D (Rhino) + Grasshopper – потужний інструмент для 3D-моделювання в архітектурі та індустріальному дизайні (рис. 1), що базується на використанні методів NURBS. Grasshopper є візуальним середовищем алгоритмічного і параметричного моделювання, де алгоритми створюються через вузли та їх зв'язки без традиційного програмування. Переваги комплексу включають швидку зміну параметрів проєкту, автоматизацію процесу дизайну, інтеграцію з Revit, AutoCAD, SolidWorks, Blender, підтримку Python і C#, а також розширення функціоналу через численні плагіни (LunchBox, Kangaroo, Weaverbird). Rhino+Grasshopper активно застосовується у створенні концептів автомобілів та дронів. Серед недоліків: фотореалістичний рендер дуже обмежений, складність освоєння логіки вузлів та висока вимогливість до ресурсів комп'ютера.

Autodesk Revit + Dynamo – важливий інструмент для інформаційного моделювання будівель і параметричного дизайну. Dynamo, як візуальна надбудова, автоматизує процеси проєктування, дозволяє створювати параметричні об'єкти та працювати з даними у динамічному середовищі (рис. 2). Ця комбінація широко застосовується для моделювання складних архітектурних форм, технічної автоматизації та оптимізації конструкцій.

Основні переваги: створення адаптивних компонентів у реальному часі; збереження інформації для управління об'єктами (освітлення, енергоефективність); генерація складних форм без прямого програмування; інтеграція з Excel, Rhino, Grasshopper, AutoCAD. Серед недоліків: складний інтерфейс через нелінійну логіку моделювання, обмежені можливості візуалізації складних форм та висока залежність продуктивності від потужності обладнання.



Рис. 1. Складна параметрична форма у Rhino

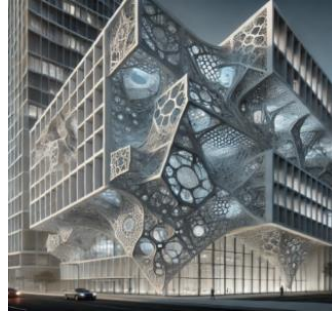


Рис. 2. Параметрична архітектура у Autodesk Revit + Dynamo

Blender + Sverchok – безкоштовний інструмент для 3D-моделювання, рендерингу, анімації та візуалізації, що функціонально нагадує Rhinoceros 3D + Grasshopper. Sverchok як додаток до Blender відкриває можливості параметричного і алгоритмічного моделювання через візуальне програмування (рис. 3). Тандем дозволяє створювати складні динамічні форми за допомогою математичних алгоритмів і генеративних процедур. Основні переваги: автоматизація створення складної геометрії без ручного редагування, використання потужних рендер-рушіїв (Cycles, Eevee), робота з фізичними симуляціями, текстурами і матеріалами. До недоліків належать: слабка інтеграція з BIM для створення технічної документації, складний інтерфейс і обмежений функціонал порівняно з Grasshopper.

Houdini – потужний інструмент для процедурного 3D-моделювання, анімації, візуальних ефектів (VFX) та симуляцій. Його вузлова система (node-based workflow) дозволяє створювати складні параметричні моделі, змінювати їх у реальному часі та інтегрувати динамічні ефекти (рис. 4).

Houdini широко використовується у виробництві фільмів, ігор, науковій візуалізації та генеративному дизайні. Програма підтримує симуляції частинок, рідин, тканин і твердих тіл, що дає змогу моделювати органічні форми, руйнування та аеродинамічні конструкції. До недоліків належать висока вартість, складність освоєння та велике навантаження на обчислювальні ресурси.



Рис. 3. Генеративна форма об'єкта дизайну в Blender



Рис. 4. Параметричне формоутворення меблів у Houdini

SolidWorks – професійне програмне забезпечення для параметричного моделювання механічних деталей, складних механізмів і виробів. На відміну від вузлових середовищ (Grasshopper, Houdini), SolidWorks застосовує ієрархічне параметричне моделювання, де зміни параметрів автоматично оновлюють конструкцію (рис. 5). Програма широко використовується в машинобудуванні, робототехніці, автомобільній, авіаційній і медичній сферах. Її переваги: можливість коригування моделей без втрати їхньої структури, вбудоване тестування механічних навантажень і кінематики, генерація технічної документації та інтеграція з CAD/CAM/CAE і 3D-друком. Серед недоліків: висока вартість, орієнтація переважно на інженерні задачі та значні вимоги до комп'ютерних ресурсів.

Autodesk Maya – інструмент для 3D-моделювання, анімації, симуляцій і рендерингу з підтримкою параметричного дизайну. Програма орієнтована переважно на анімацію та VFX, використовуючи Bifrost Graph і Mash для процедурного моделювання. Серед переваг: гнучке параметричне моделювання, створення біонічних поверхонь, динамічні симуляції та фотореалістичний рендеринг через Arnold і Redshift (рис. 6). До недоліків належать: потреба знань MEL/Python, нижча точність порівняно з SolidWorks чи Rhino, а також висока вартість ліцензії.

SketchUp – інструмент із простим інтерфейсом для 3D-моделювання в архітектурі, дизайні інтер'єрів та містобудуванні. Сам SketchUp не підтримує параметричне моделювання, однак його можливості розширюються через плагіни: Profile Builder, Curviloft, Fredo6 Plugins, Parametric Modeling Extension (рис. 7). Програма активно застосовується для створення фасадів, дахів, колон, рельєфів і модульних систем. Серед переваг: низький поріг входу, швидке створення концептуальних моделей, велика бібліотека готових 3D-об'єктів (3D Warehouse), можливість автоматизації процесів за допомогою плагінів.

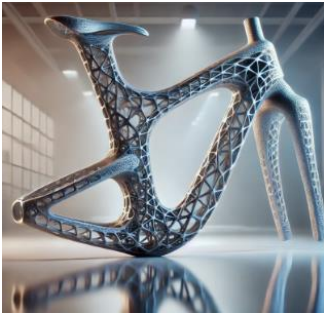


Рис. 5. Інженерна параметрична конструкція у SolidWorks



Рис. 6. Біонічна структура у Autodesk Maya

До недоліків належать: обмежена підтримка складного параметричного дизайну, неможливість моделювання складних інженерних об'єктів і додаткові витрати на плагіни.

Проведений вище аналіз найбільш популярних програмних продуктів для параметричного моделювання об'єктів дав можливість класифікувати ефективність їх застосування, як інструментарію для формування параметричного стилю у різних галузях дизайну (табл. 1).



Рис. 7. Параметрична модель меблів у SketchUp

До перспективних напрямів використання наведених програмних продуктів для параметричного дизайну можна віднести широке впровадження елементів AI-генеративного дизайну, тобто своєрідної синергії творця та комп'ютерної програми. Це буде удосконалювати ефективність роботи програмних інструментів в сенсі формулювання технічного завдання, генерації початкових ідей проекту і доведення його практично до ідеалу.

Перспективним також є напрям удосконалення AR/VR (доповнена/віртуальна реальність) візуальних технологій в сучасних комп'ютерних програмах. Їх розвиток відкриє нові можливості для стилю параметрики за рахунок перенесення проєктованих об'єктів у віртуальний простір, цифрової симуляції впливу параметрів розробки на якісні характеристики дизайнерських рішень.

Таблиця 1. Класифікація програмних інструментів параметричного моделювання за галузями проєктування

Галузь	Найбільш ефективні програмні інструменти параметрики
Архітектура та будівництво	Rhino+Grasshopper, Revit+Dynamo, SketchUp+Plugins
Індустріальний дизайн	SolidWorks, Rhino+Grasshopper
Анімація та VFX (<i>створення візуальних ефектів для ігор, фільмів, реклами</i>)	Houdini, Maya, Blender + Sverchok
Ювелірний дизайн	Rhino+Grasshopper, Blender+Sverchok
Дизайн об'єктів машинобудування	SolidWorks
Дизайн інтер'єрів	Revit+Dynamo, SketchUp+Plugins
Вебдизайн	Blender + Sverchok, Maya

Параметричний стиль вже сьогодні відіграє важливу роль у багатьох галузях дизайну, проте його розвиток у найближчі 5-10 років буде визначатися технологічними інноваціями, що включатимуть штучний інтелект, 3D-друк, роботизоване виробництво та біонічні форми. До перспективних напрямів розвитку параметричного стилю в дизайні слід віднести:

Застосування генеративного дизайну на основі ШІ. Це передбачає використання алгоритмів штучного інтелекту для автоматизованого створення оптимальних форм та структур. Дизайнер повинен тільки коректно задавати необхідні параметри об'єкту проєктування, а нейромережа генеруватиме варіанти на їх основі. В архітектурі такий підхід забезпечить повністю автоматизоване проєктування будівель, в авіабудуванні – відкриє нові можливості створення легких та міцних конструкцій, в робототехніці – дозволить створювати адаптивні конструкції роботів. Розвиток даного напрямку має і ряд застережень, які пов'язані із вимогами до обчислювальних ресурсів, відсутністю стандартизованих рішень, проблемами авторського права (наприклад, хто «створив» об'єкт генеративного дизайну – людина чи ШІ).

Біонічний та адаптивний дизайн, параметризм якого полягає в наслідуванні природних форм та механізмів у дизайні. Дані органічні структури можуть бути ефективнішими, ніж традиційні геометричні форми в таких галузях дизайну, як 3D-друк органів в біоінженерії, в ювелірному дизайні при створенні креативних органічних форм виробів, в біонічному будівництві, де конструкції будуть реагувати на навколишнє середовище. Тут труднощі можуть виникнути на етапі моделювання, із-за високої складності створення природних форм та біосумісності матеріалів.

Інтеграція параметричного дизайну в створення динамічних віртуальних середовищ AR/VR є перспективним напрямом для розробки віртуальних міст у метавсесвітах, геймдизайні, формуванні параметричних локацій та візуалізації інтер'єрів. Основними викликами для розвитку цього напрямку є відсутність ефективних методів оптимізації моделей віртуального простору та потреба у використанні надпотужних обчислювальних ресурсів.

Роботизоване та цифрове виробництво, суть якого полягає у використанні параметричних моделей для автоматизованого виробництва із використанням 3D-друку, CNC, лазерного різання. Це є перспективним напрямом для 3D-друку будинків, виробництва меблів, без таких технологій неможливий розвиток аерокосмічної галузі. При цьому, для запровадження даного напрямку слід швидко адаптовувати процеси програмування сучасних машин під параметричні алгоритми і знижувати надто високу вартість виробничого обладнання.

Активне впровадження клімат-орієнтованого дизайну, основою якого є використання параметричного стилю для створення будівель та об'єктів, що змінюють форму і поведінку залежно від погодних умов. Такий напрям особливо актуальний в оптимізації розташування будівель містобудівної галузі за критерієм енергоефективності та архітектурі, де параметрика буде працювати на розумні конструкції споруд, що реагують на кліматичні умови середовища. Труднощі впровадження таких технологій будуть пов'язані зі складністю у прогнозуванні довготривалих кліматичних змін та високою вартістю екологічних матеріалів.

Особливої уваги заслуговує **запровадження та активне використання дискретно-воксельного параметричного дизайну**. Дискретно-воксельний параметричний дизайн (ДВПД) – це новий підхід до параметричного моделювання, в якому параметричні об'єкти представляються множинами тривимірних кубічних вокселів [11], [12]. Основна ідея полягає у тому, що будь-яка складна форма описується не традиційними параметричними кривими чи поверхнями, а дискретними елементами (вокселями), що дозволяє ефективно моделювати складні та адаптивні структури. Методологічно ДВПД базується на декількох взаємопов'язаних складових:

- **дискретизації простору**, тобто переходу від неперервного представлення геометрії проєктованого об'єкту до розбиття його на окремі вокселі;
- **дискретному генеративному підході**, який полягає у використанні спеціальних алгоритмів для автоматизованого створення дискретно представлених параметричних моделей;
- **адаптивності та гнучкості**, тобто можливості модифікації окремих вокселів або їх груп для створення складних структур;
- **ітеративних алгоритмах оптимізації**, тобто використанні

унікальних форм, адаптованих до складних умов проектування. До перспективних напрямів розвитку дискретно-воксельної параметризації належать: використання ДВПД у 3D-друці для створення адаптивних об'єктів зі змінними матеріальними властивостями; інтеграція машинного навчання для автоматизованої генерації воксельних форм; розширене застосування дискретної параметризації в біодизайні, медицині (зокрема для моделювання біомеханічних структур), дизайні меблів і технічних конструкцій.

Висновки

У даній роботі досліджено взаємозв'язок тріади основних методологічних засад параметризму, що дозволило окреслити нові перспективи розвитку цього напрямку як сучасного стилю в архітектурі та дизайні. Усі поставлені дослідницькі завдання виконано.

1. Визначено концепцію стилю параметрики як архітектурно-дизайнерської системи, у якій усі елементи та комплекси є гнучкими і підпорядковуються параметричній логіці. Основним інструментом досягнення логічної гнучкості є алгоритмізація функціональних зв'язків між множиною параметрів окремих складових процесу дизайн-проекування. Методологія стилю параметризму відображає принципи побудови природних систем, у яких форми є результатом взаємодії факторів, що організовують складні та ніби розрізнені елементи у цілісну структуру.

2. Проведено аналіз найбільш популярних комп'ютерних програм стосовно можливостей параметричного моделювання 3D-об'єктів. За результатами аналізу здійснено класифікацію програм за ефективністю їх застосування як інструментів формування параметричного стилю у різних галузях дизайну.

3. Визначено перспективні напрями розвитку параметричного стилю в дизайні, серед яких: застосування генеративного дизайну на основі ІІІ; біонічний та адаптивний дизайн; інтеграція параметричного моделювання у створення динамічних віртуальних середовищ AR/VR; розвиток роботизованого і цифрового виробництва; активне впровадження клімат-орієнтованого проектування. Розвиток цих напрямів відкриє нові можливості для параметрики, зокрема шляхом перенесення проєктованих об'єктів у віртуальне середовище та симуляції впливу параметрів на якість дизайнерських рішень.

4. Особливу увагу приділено запровадженню дискретно-воксельного параметричного дизайну як інноваційного підходу до створення параметричних моделей. У цьому підході об'єкти представляються множинами тривимірних кубічних вокселів. Його основна ідея полягає в тому, що складні форми описуються не традиційними параметричними кривими чи поверхнями, а дискретними елементами (вокселями), що дозволяє ефективно моделювати складні та адаптивні структури у різних галузях дизайн-проектування.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори засвідчують, що під час підготовки тексту штучний інтелект не використовувався. Водночас, окремі ідеї для формування параметричних моделей графічної частини були згенеровані з використанням інструментів штучного інтелекту.

References

1. Casale, A., Valenti, G. M., Calvano, M., & Romor, J. (2013). Surfaces: concept, design, parametric modeling, and prototyping. *Nexus Network Journal*, 15(2), 271–283.
2. Frazer, J. (2016). Parametric computation: History and future. *Architectural Design*, 86(2), 18–23.
3. Robert Aish, Robert Woodbury. Multi-level Interaction in Parametric Design. *International Journal of Architectural Computing*, London. 2005. PP. 89-104. DOI: 10.1260/1478077053739492.
4. Mark Burry. Parametric Design and Digital Fabrication. *International Journal of Architectural Computing*, London. 2005. PP. 1-17. DOI: 10.1260/1478077053739492.
5. Patrik Schumacher. Parametricism: A New Global Style for Architecture and Urban Design. *Journal of Architectural Design*, London. 2009. PP. 14-23. DOI: 10.1002/ad.912.
- 6 Schumacher, P. (Ed.). (2016). *Parametricism 2.0: Rethinking architecture's agenda for the 21st century* (1st ed.). Academy Press.

- 7 Schumacher, P. (2023, February 6). Parametricism: The next decade. Patrik Schumacher. <https://patrikschumacher.com/parametricism-the-next-decade/>
8. Achim Menges. Material Resourcefulness: Activating Material Information in Computational Design. *Journal of Architectural Design*, London. 2012. PP. 34-41. DOI: 10.1002/ad.1370.
9. Lytvynenko O.V., Lytvynenko S.V. Kharakterni rysy parametrychnoi arkhitektury ta istorichni etapy yii formuvannia. *Suchasni problemy arkhitektury ta mistobuduvannia*, випуск 67. 2022. S. 57-68. DOI: 10.32347/2077-3455.2022.67.57-68.
10. Samchuk V., Pustiulha S., Prystupa O. Stanovlennia ta perspektyvy rozvytku parametrychnoho dyzainu. *Aktualni problemy suchasnoho dyzainu*, випуск 1. 2023. S. 371-374. DOI: 10.30857/apsd 2023.1.37.
11. Pustiulha S.I., Samchuk V.P., Holovachuk I.P., Lelyk Ya.R., Klak Yu.V. Dyskretno-vokselne predstavlennia modelei ob'ektiv dlia identyfikatsii ta rozrakhunku yikh fraktalnykh parametriv. *Prykladna heometriia ta inzhenerna hrafika: Fakhovyi zhurnal*. KNUBA - K., 2022. - Vyp. 103. – S. 185-200.
12. Pustiulha S.I., Samchuk V.P., Pasichnyk O.S., Chuhai R.V., Hradyska N.B. Dyskretno-vokselnyi parametrychnyi dyzain. *Teoriia ta praktyka dyzainu*: zb. Nauk. Prats. Dyzain. K.: NAU, 2023. Vyp. 27. S. 165-174. DOI: 10.32782/2415-8151.2023.27.21.

Література

1. Casale, A., Valenti, G. M., Calvano, M., & Romor, J. (2013). Surfaces: concept, design, parametric modeling, and prototyping. *Nexus Network Journal*, 15(2), 271–283.
2. Frazer, J. (2016). Parametric computation: History and future. *Architectural Design*, 86(2), 18–23.
3. Robert Aish, Robert Woodbury. Multi-level Interaction in Parametric Design. *International Journal of Architectural Computing*, London. 2005. PP. 89-104. DOI: 10.1260/1478077053739492.
4. Mark Burry «Parametric Design and Digital Fabrication». *International Journal of Architectural Computing*, London. 2005. PP. 1-17. DOI: 10.1260/1478077053739492.
5. Patrik Schumacher. Parametricism: A New Global Style for Architecture and Urban Design. *Journal of Architectural Design*, London. 2009. PP. 14-23. DOI: 10.1002/ad.912.
- 6 Schumacher, P. (Ed.). (2016). Parametricism 2.0: Rethinking architecture's agenda for the 21st century (1st ed.). Academy Press.
- 7 Schumacher, P. (2023, February 6). Parametricism: The next decade. Patrik Schumacher. <https://patrikschumacher.com/parametricism-the-next-decade/>
8. Achim Menges. Material Resourcefulness: Activating Material Information in Computational Design. *Journal of Architectural Design*, London. 2012. PP. 34-41. DOI: 10.1002/ad.1370.
9. Литвиненко О.В., Литвиненко С.В. Характерні риси параметричної архітектури та історичні етапи її формування. *Сучасні проблеми архітектури та містобудування*, випуск 67. 2022. С. 57-68. DOI: 10.32347/2077-3455.2022.67.57-68.

10. Самчук В., Пустюльга С., Приступа О. Становлення та перспективи розвитку параметричного дизайну. *Актуальні проблеми сучасного дизайну*, випуск 1. 2023. С. 371-374. DOI: 10.30857/apsd 2023.1.37.

11. Пустюльга С.І., Самчук В.П., Головачук І.П., Лелик Я.Р., Клак Ю.В. Дискретно-воксельне представлення моделей об'єктів для ідентифікації та розрахунку їх фрактальних параметрів. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*: Фаховий журнал. КНУБА - К., 2022. - Вип. 103. – С. 185-200.

12. Пустюльга С.І., Самчук В.П., Пасічник О.С., Чугай Р.В., Градиська Н.Б. Дискретно-воксельний параметричний дизайн. *Теорія та практика дизайну*: зб. наук. праць. Дизайн. К.: НАУ, 2023. Вип. 27. С. 165-174. DOI: 10.32782/2415-8151.2023.27.21.

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 21.05.2025	Received 21.05.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 22.05.2025	Received in revised form 22.05.2025
Прийнято 01.06.2025	Accepted 01.06.2025
Опубліковано 25.06.2025	Published 25.06.2025

S. I. Pustiulha

D.Sc. in Engineering, Professor, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7623-7803>

Department of Architecture and Design

Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

V. P. Samchuk*

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9045-9525>

Department of Building and Civil Engineering

Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

Yu. S. Bondarchuk

Ph.D. in Arts, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1890-9795>

Department of Architecture and Design

Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

M. V. Zarazka

PhD student, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7652-5563>

Department of Architecture and Design

Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

*corresponding author, e-mail: volodsam@ukr.net

Parametricism as a Style in Architecture and Design: Concept, Methodology, Computer Tools, and Development Prospects

How to Cite:

Pustiulha S. I., Samchuk V. P., Bondarchuk Yu. S., Zarazka M. V. (2025). Parametricism as a style in architecture and design: concept, methodology, computer tools, and development prospects. *Modern*

technologies and methods of calculations in construction, 23, 222-239. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-20](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-20)

Abstract. This paper explores the interrelation of the triad of fundamental methodological principles of parametricism as a contemporary style in design and outlines several new prospects for the development of the parametric style.

The concept of parametric style is defined as an architectural and design system in which all elements and complexes are flexible and subordinate to parametric logic. The primary tool for achieving such logical flexibility is the algorithmization of functional relationships between multiple parameters of all components within the design process.

The methodology of parametricism is based on the principle of constructing natural systems, where forms emerge as a result of the interaction of factors that organize complex and seemingly disparate elements into a coherent structure.

An analysis of the most popular computer programs for parametric 3D modeling has been conducted. Based on the results, a classification of these programs has been developed according to their effectiveness as tools for shaping parametric style in various fields of design.

The promising directions for the further development of parametric style include: the use of AI-based generative design; bionic and adaptive design; the integration of parametric design into dynamic virtual environments (AR/VR); robotic and digital manufacturing; and the active implementation of climate-oriented design. The advancement of these areas will open new opportunities for the parametric style by enabling the transfer of designed objects into virtual environments and by simulating the impact of design parameters on the qualitative characteristics of design solutions.

Special attention is given to Discrete Voxel Parametric Design as a novel approach to parametric modeling. Its core idea lies in the fact that complex forms are represented not through traditional parametric curves or surfaces, but through discrete elements – voxels. Each voxel can carry its own set of parameters, enabling more detailed and flexible modeling of complex and adaptive structures across various fields of design and project development.

Keywords: parametric style, conceptual foundations, methodology of parametric design, computer tools, discrete voxel parametric design.

УДК 691.175

М. В. Русецька

аспірантка, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7168-7552>

Кафедра будівництва

Київський національний університет біоресурсів і природокористування України, вул. Героїв
Оборони, 15, Київ, Україна, 03041

Є. А. Бакулін

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0238-5384>

Кафедра будівництва

Київський національний університет біоресурсів і природокористування України, вул. Героїв
Оборони, 15, Київ, Україна, 03041

*автор-кореспондент, e-mail: m.rusetska@nubip.edu.ua

Сендвіч-панелі з базальтовим, мінераловатним і пінополістирольним утеплювачем: порівняльний аналіз властивостей на основі експериментальних досліджень

Цитувати як:

Русецька М. В., Бакулін Є. А. (2025). Сендвіч-панелі з базальтовим, мінераловатним і пінополістирольним утеплювачем: порівняльний аналіз властивостей на основі експериментальних досліджень. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 23, 240-249. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-21](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-21)

© 2025, Русецька М. В., Бакулін Є. А.

Анотація. У статті досліджено конструктивно-технологічні особливості застосування стінових сендвіч-панелей із базальтовим утеплювачем з урахуванням сучасних вимог до енергоефективності, пожежної безпеки та механічної міцності. Проведено порівняльний аналіз ключових фізико-механічних характеристик трьох основних типів утеплювачів, що найчастіше використовуються в сендвіч-панелях: базальтового волокна, мінеральної вати та пінополістиролу. Проведено узагальнення та систематизація результатів експериментальних досліджень щодо теплофізичних, міцнісних, вогнестійких та технологічних властивостей сендвіч-панелей. Особливу увагу приділено аналізу поведінки матеріалів при підвищених температурах, що є критично важливим для запобігання поширенню вогню у разі пожежі. Огляд літератури показує, що базальтові утеплювачі демонструють найвищу вогнестійкість і стабільні теплофізичні властивості при температурах до 300 °С, особливо у поєднанні з неорганічними або геополімерними зв'язувальними, а також високу міцність на згин і стиск. Встановлено, що мінеральна вата має добрі теплозахисні характеристики, однак її міцність та температурна стабільність є нижчими. Пінополістирол, хоч і демонструє задовільну теплопровідність при низьких температурах, втрачає свої властивості при нагріванні вище 60 °С. У сукупності ці дослідження дозволяють обґрунтовано оцінити конструктивні обмеження і переваги кожного типу утеплювача з точки зору довговічності, безпеки та енергоефективності. Отримані результати

порівняння є корисними для вдосконалення конструкції сендвіч-панелей, правильного вибору утеплювача залежно від умов експлуатації та підвищення загальної ефективності й безпеки будівель.

Ключові слова: сендвіч-панелі, базальтовий утеплювач, теплофізичні властивості, конструктивно-технологічні особливості, енергоефективність.

Вступ

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Робота виконана у рамках наукових досліджень кафедри будівництва НУБіП України [1] і є продовженням розвитку та вдосконалення ефективних екологічних будівельних матеріалів [2, 3], які безумовно впливають на подальшу безпечну експлуатацію будівель та інженерних споруд [4] із урахуванням підготовки та інженерного захисту територій нового будівництва [5] або проведення реконструкції [6]. Основна проблема, що потребує розв'язання, — це відсутність узагальненої порівняльної оцінки ефективності трьох основних типів утеплювачів у контексті сучасних вимог до енергоефективності, пожежної безпеки та конструктивної надійності.

Мета і завдання дослідження. Метою цього розділу є узагальнення та систематизація результатів провідних експериментальних досліджень щодо теплофізичних, міцнісних, вогнестійких та технологічних властивостей сендвіч-панелей з трьома основними типами утеплювачів: базальтовим, мінераловатним та пінополістирольним. Порівняння здійснюється з акцентом на практичне значення результатів для подальшої розробки раціональних конструкцій панелей.

Матеріали та методи

У дослідженні застосовано **аналітичний та порівняльний методи**, спрямовані на узагальнення результатів експериментальних праць, опублікованих в міжнародних наукових виданнях. Основним джерелом інформації є рецензовані наукові статті, де описано результати випробувань сендвіч-панелей з утеплювачами трьох типів — базальтовим, мінераловатним та пінополістирольним. В результаті експериментів були досліджені наступні параметри: коефіцієнт теплопровідності (λ) у широкому температурному діапазоні (від кімнатної до 600–1000 °C), міцність на стиск (МПа) при стандартних та підвищених температурах, міцність на згин (МПа) із урахуванням армування, вогнестійкість відповідно до стандарту ISO 834.

Результати та обговорення

У ході опрацювання наукових джерел, зокрема іноземних досліджень, проведено порівняння теплоізоляційних, механічних, вогнестійких та технологічних характеристик сендвіч-панелей, утеплених базальтовим утеплювачем, мінеральною ватою та пінополістиролом.

У класичному дослідженні Wang et al. (2015) було змодельовано та виготовлено серію залізобетонних сендвіч-панелей із двома типами армування: базальтовими композитними стрижнями (BFRP) та традиційними сталевими зв'язками. Під час триточкового випробування на згин виявилося, що панелі з BFRP забезпечують порівняну або навіть вищу жорсткість при значно меншій масі конструкції [7]. Окрім того, застосування базальтових з'єднувачів дозволяло мінімізувати теплові мости, забезпечуючи кращий термофізичний розрив між зовнішніми листами панелі і, як наслідок, зниження втрат тепла в місцях стиків.

У роботі Li et al. (2023) експериментально досліджували механічні та теплоізоляційні властивості геополімерних сендвіч-панелей із базальтовим армуванням. Для оцінки експлуатаційної надійності використали випробування на стиск і згин, а також стандартизоване вогнестійке випробування ISO 834 (до 1000 °C). Результати показали, що панелі зберігають несучу здатність після експозиції полум'я понад 60 хвилин, а коефіцієнт теплопровідності їхнього базальтового прошарку становить близько 0,037 Вт/(м·K) [8]. Ці дані свідчать про високу термостійкість та структурну стабільність геополімер-базальтових систем навіть за екстремальних температур.

Karkhut & Penko (2022) акцентували увагу на поведінці сендвіч-панелей із мінераловатним утеплювачем при згині в двох температурних режимах: +20 °C та +250 °C. Під час випробувань було встановлено, що при підвищенні температури жорсткість панелей знижується на 35–50 %, а руйнування відбувається переважно по межі між теплоізоляційною плитою та клейовим шаром [9]. Крім того, присутність вологи в утеплювачі значно погіршує збереження форми конструкції, що підкреслює необхідність ретельного захисту від вологи та використання термостабільних адгезивів.

Розширюючи тему, Wójtowicz & Tomanek (2023) застосували метод лазерного спалаху для визначення теплофізичних характеристик мінераловатних плит за температур до 600 °C. Було встановлено, що коефіцієнт теплопровідності мінеральної вати зростає від 0,038 до 0,057 Вт/(м·K) у міру нагріву, а при зволоженні ефективність теплоізоляції різко падає через капілярну конвекцію [10]. Ці результати демонструють, що вогнестійкість мінеральної вати зберігається, але її теплоізоляційні властивості можуть суттєво залежати від умов експлуатації.

У дослідженні Semko et al. (2024) розглянули сендвіч-панелі з пінополістирольним утеплювачем, підсилені базальтовими волокнами. Механічні випробування на згин і зсув показали, що без армування ППС виявляє крихкість і низьку несучу здатність, а армування частково підвищує міцність, проте не компенсує вразливість до високих температур [11]. Водночас теплопровідність пінополістиролу становить близько 0,043 Вт/(м·K), але вона знижується з часом через старіння полімеру та мікротріщини в структурі.

Провели комплексні випробування легких сендвіч-панелей із ППС-утеплювачем Al-Saadi et al. (2023), охопивши щільність, міцність на стиск і теплопровідність. Виявилося, що міцність на стиск таких панелей зазвичай не перевищує 0,8 МПа, що є недостатнім для конструкційних елементів, водночас теплопровідність залишається в межах 0,042–0,045 Вт/(м·К) [12]. Автори дійшли висновку, що ППС-панелі можуть ефективно використовуватися лише для внутрішніх перегородок або в нежитлових будівлях із невисокими вимогами до вогнестійкості та механічної стійкості.

Після детального розгляду окремих досліджень можна наочно продемонструвати ключові переваги та обмеження трьох основних матеріалів – базальтового утеплювача, мінеральної вати та пінополістиролу (EPS).

Графік (рис. 1) демонструє зміну коефіцієнта теплопровідності (λ , Вт/м·К) трьох основних видів утеплювачів залежно від температури

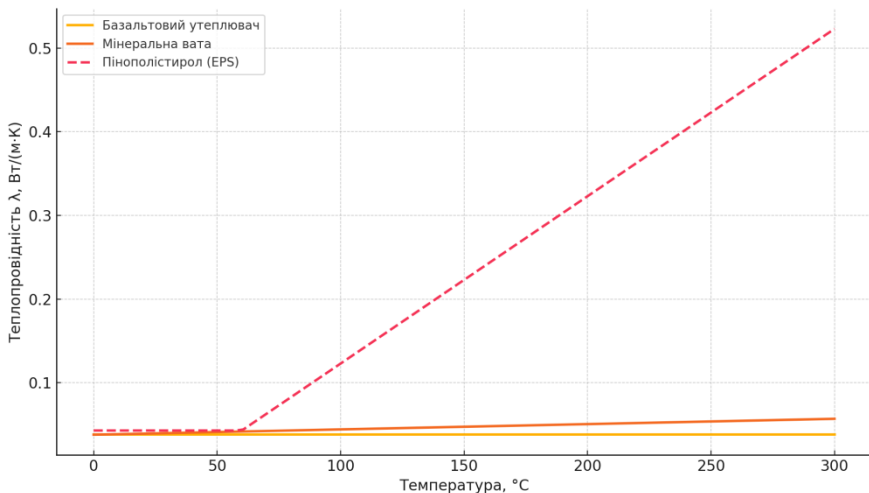


Рис. 1. Графік теплопровідності

Базальтовий утеплювач показує практично стабільну теплопровідність (~0,038 Вт/м·К) в усьому діапазоні температур до 300 °С, що свідчить про високу термостійкість та стабільність ізоляційних властивостей, що є критичним у пожежобезпечному будівництві. Теплопровідність мінеральної вати плавно зростає від ~0,038 до 0,057 Вт/м·К при підвищенні температури до 300 °С. Це означає, що при високих температурах ефективність утеплення знижується, хоча матеріал залишається негорючим. Пінополістирол (EPS) до 60 °С має стабільну теплопровідність (~0,043 Вт/м·К), але після цього значення різко зростає,

що вказує на деформацію або початок термічного руйнування, тому EPS не рекомендується до використання у конструкціях з підвищеними вимогами до вогнестійкості.

Графік (рис.2) відображає порівняльну міцність на стиск (МПа). У контексті міцності на стиск, базальтовий утеплювач є беззаперечним лідером, що підтверджує його універсальність та доцільність у багатофункціональних конструкційних рішеннях, особливо для сучасних сендвіч-панелей з підвищеними вимогами до навантажень та пожежної безпеки.

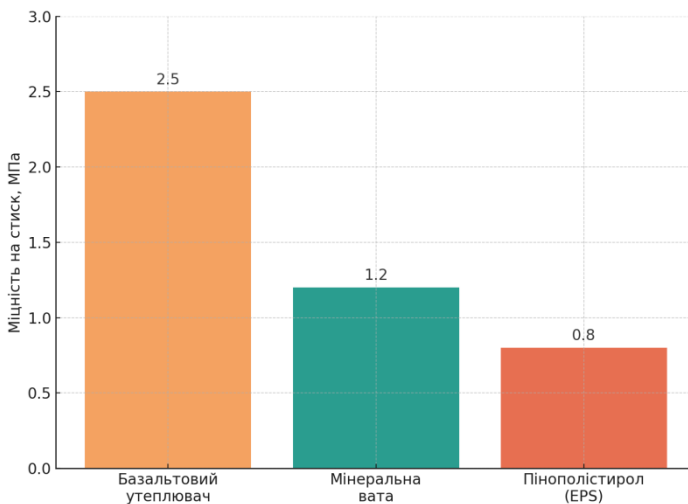


Рис. 2. Графік міцності на стиск

Мінеральна вата має помірну міцність на стиск і підходить для конструкцій із середніми механічними навантаженнями, проте потребує додаткового армування або жорсткого зовнішнього шару в панелі. Пінополістирол (EPS) має найнижчу міцність на стиск, виявляє крихкість і обмежену здатність до несення навантаження, тому його використання доцільне в ненавантажених конструкціях, наприклад, для заповнення стін чи перегородок у нежитлових приміщеннях.

Наступний графік (рис. 3) ілюструє середню міцність на згин (МПа), де базальтовий утеплювач демонструє найвищий показник серед представлених матеріалів.

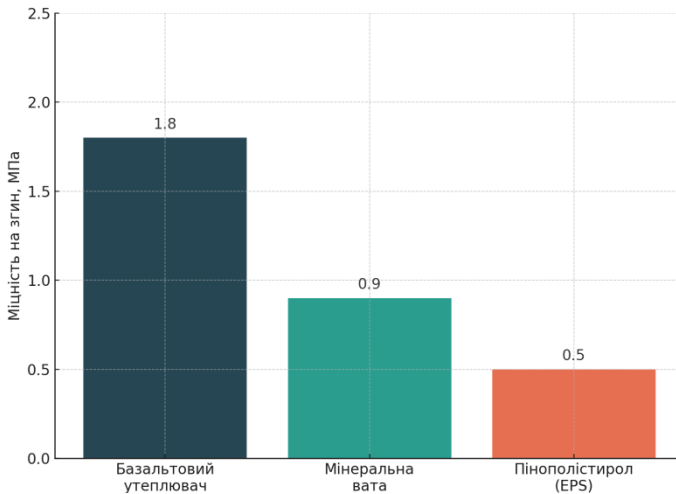


Рис. 3. Графік міцності на згин

Завдяки армуванню базальтовими волокнами або BFRP-зв'язками, забезпечується висока жорсткість і тривка форма конструкції. Це робить його ідеальним для навантажених елементів будівельних огорожень. Міцність на згин мінеральної вати є помірною і залежить від температури. При нагріванні жорсткість падає на 35–50 % [9]. Підходить для застосування в умовах середнього навантаження, але потребує захисту від вологи та армованих зовнішніх шарів. Пінополістирол має найнижчу міцність на згин. Навіть за армування базальтовими волокнами жорсткість збільшується незначно, а висока крихкість залишається [9]. Матеріал не придатний для відповідальних конструкцій, особливо під навантаженням і при впливі температур.

Висновки

Отримані результати дозволяють зробити висновок про доцільність застосування базальтового утеплювача в сучасних сендвіч-панелях, де критичними є енергоефективність, вогнестійкість та довговічність. Використання та для створення раціональних конструкцій сендвіч-панелей.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1.Yakovenko, I. A., & Bakulin, Y. A. (2023). Directions of scientific research at the Department of Construction of NULES of Ukraine. In *Proceedings of the 10th International Scientific and Technical Conference "Kramarov Readings" dedicated to the 116th anniversary of the birth of Doctor of Technical Sciences, Professor, Corresponding Member of VASKhNIL, Vice President of UASN V. S. Kramarov (1906–1987) and the 125th anniversary of NULES of Ukraine* (Kyiv, February 24–25, 2023, pp. 488–491). Kyiv: NULES of Ukraine.

2.Rusetska, M. V., & Bakulin, Y. A. (2024). Basalt insulation: A natural "green material" for modern constructions. *Modern Technologies and Calculation Methods in Construction*, (22), 5–15. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-12\(22\)-01](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-12(22)-01)

3.Bakulin, Y. A., & Rusetska, M. V. (2024). Innovation, efficiency, and sustainability of sandwich wall panels with basalt insulation. In *Proceedings of the 23rd International Conference of Scientific and Pedagogical Staff, Researchers, and Postgraduates "Problems and Prospects for the Development of Technical and Bioenergy Systems of Nature Management, Design and Engineering"* (Kyiv, April 11–12, 2024, pp. 78–80). Kyiv: NULES of Ukraine.

4.Bakulin, Y. A. (2013). Deformations as indicators of hazards and risks of damage in operated buildings. *Construction of Ukraine*, (5), 2–5.

5.Bakulin Y.A. Engineering protection and preparation of territories: study guide; under the editorship of Cand. Tech. science Ye.A. Bakulin / Ye.A. Bakulin, I.A. Yakovenko, V.M. Bakulina. – Kyiv: NULES of Ukraine, 2022. – 205 p.

6.Yakovenko I., Bakulin Y. & Bakulina V. (2020) Classification methods of civil buildings reconstruction // Theoretical and scientific foundations of engineering: collective monograph / Apostolova R., Shembel E., Aurbach D., Markovsky B., etc. – International Science Group. – Boston: Primedia eLaunch, 2020. 180 p., pp. 70–96. <https://doi.org/10.46299/issg.2020.MONO.TECH.II>

7.Wang, Z., Wang, H., & Bai, Y. (2015). Flexural behavior of precast concrete sandwich wall panels with basalt FRP and steel reinforcement. *PCI Journal*, (6), 90–106. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/285629916_Flexural_behavior_of_precast_concrete_sandwich_wall_panels_with_basalt_FRP_and_steel_reinforcement

8.Pei, R., Hua, L., Zhao, H., Wang, X., Li, S., & Wu, Z. (2025). Experimental study on mechanical and thermal insulation properties of a geopolymer-based fireproof sandwich panel. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 22(2), 1–10. <https://doi.org/10.1111/ijac.14966>

- 9.Kowal, M., & Dziurka, D. (2023). Determination of thermal properties of mineral wool required for the safety analysis of sandwich panels subjected to fire loads. *Materials*, 16(17), 5852. <https://doi.org/10.3390/ma16175852>
10. Shoushtarian Mofrad, A., & Pasternak, H. (2020). Behaviour of mineral wool sandwich panels under bending load at room and elevated temperatures. *Engineering Structures and Technologies*, 12(1), 25–31. <https://doi.org/10.3846/est.2020.14046>
11. Zhang, Y., Wang, Y., & Li, J. (2025). Research on the flexural performance of basalt fiber-reinforced steel–expanded polystyrene foam concrete composite wall panels. *Buildings*, 15(2), 285. <https://doi.org/10.3390/buildings15020285>
12. El-Gamal, S., Al-Kalbani, A., & Al-Hatmi, O. (2022). Developing and investigating the performance of thermal insulation lightweight sandwich wall panels. In S. Walbridge, M. Nik-Bakht, K. T. Ng, M. Shome, M. S. Alam, A. el Damatty, & G. Lovegrove (Eds.), *Lecture Notes in Civil Engineering* (Vol. 240, pp. 653–666). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-19-0507-0_57

Література

- 1.Яковенко І.А. Напрями наукових досліджень кафедри будівництва НУБіП України / І.А. Яковенко, Є.А. Бакулін // Зб. тез доп. Х Міжн. наук.-техн. конф. «Крамаровські читання» з нагоди 116-ї річниці від дня народження д.т.н.,проф., чл.-кор. ВАСГНІЛ, віцепрез. УАСГН В.С. Крамарова (1906–1987) та 125 річниці НУБіП України (24–25 лютого 2023 р., м. Київ). – К.: НУБіП України, 2023. – С. 488–491.
- 2.Русецька М.В. Базальтовий утеплювач – природний «зелений матеріал» для сучасних конструкцій / М.В. Русецька, Є.А. Бакулін // Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. – 2024. – № 22. – С. 5–15. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-12\(22\)-01](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-12(22)-01)
- 3.Бакулін Є.А. Інноваційність, ефективність, сталість стінових сендвіч-панелей з базальтовим утеплювачем / Є.А. Бакулін, М.В. Русецька // Зб. тез доп. XXIII Міжн. конф. наук.-педаг. працівників, наук. співробітників та аспірантів «Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування конструювання та дизайн» (11–12 квітня 2024 р.), – К.: НУБіП України, 2024.– С. 78–80.
- 4.Бакулін Є.А. Деформації як індикатори небезпек та ризику руйнування експлуатованих будівель /Є.А. Бакулін // Будівництво України. –2013. – №5. – С. 2–5.
- 5.Bakulin, Y. A., Yakovenko, I. A., & Bakulina, V. M. (2022). *Engineering protection and preparation of territories: Study guide* (Ye. A. Bakulin, Ed.). Kyiv: National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. 205 p.
- 6.Yakovenko, I., Bakulin, Y., & Bakulina, V. (2020). Classification methods of civil building reconstruction. In R. Apostolova, E. Shembel, D. Aurbach, B. Markovsky et al. (Eds.), *Theoretical and scientific foundations of engineering: Collective monograph* (pp. 70 – 96). Boston: Primedia eLaunch. https://doi.org/10.46299/issg.2020.MONO.TEC_H.II

7. Wang, Z., Wang, H., & Bai, Y. (2015). Flexural behavior of precast concrete sandwich wall panels with basalt FRP and steel reinforcement. *PCI Journal*, (6), 90–106. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/285629916_Flexural_behavior_of_precast_concrete_sandwich_wall_panels_with_basalt_FRP_and_steel_reinforcement
8. Pei, R., Hua, L., Zhao, H., Wang, X., Li, S., & Wu, Z. (2025). Experimental study on mechanical and thermal insulation properties of a geopolymer-based fireproof sandwich panel. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 22(2), 1–10. <https://doi.org/10.1111/ijac.14966>
9. Kowal, M., & Dziurka, D. (2023). Determination of thermal properties of mineral wool required for the safety analysis of sandwich panels subjected to fire loads. *Materials*, 16(17), 5852. <https://doi.org/10.3390/ma16175852>
10. Shoushtarian Mofrad, A., & Pasternak, H. (2020). Behaviour of mineral wool sandwich panels under bending load at room and elevated temperatures. *Engineering Structures and Technologies*, 12(1), 25–31. <https://doi.org/10.3846/est.2020.14046>
11. Zhang, Y., Wang, Y., & Li, J. (2025). Research on the flexural performance of basalt fiber-reinforced steel-expanded polystyrene foam concrete composite wall panels. *Buildings*, 15(2), 285. <https://doi.org/10.3390/buildings15020285>
12. El-Gamal, S., Al-Kalbani, A., & Al-Hatmi, O. (2022). Developing and investigating the performance of thermal insulation lightweight sandwich wall panels. In S. Walbridge, M. Nik-Bakht, K. T. Ng, M. Shome, M. S. Alam, A. el Damatty, & G. Lovegrove (Eds.), *Lecture Notes in Civil Engineering* (Vol. 240, pp. 653–666). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-19-0507-0_57

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 19.05.2025	Received 19.05.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 23.05.2025	Received in revised form 23.05.2025
Прийнято 01.06.2025	Accepted 01.06.2025
Опубліковано 25.06.2025	Published 25.06.2025

M. V. Rusetska

PhD Student, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7168-7552>

Department of Construction

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Heroiv Oborony St., 15, Kyiv, Ukraine, 03041

Ye. A. Bakulin

PhD (Tech. Sci.), Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0238-5384>

Department of Construction

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Heroiv Oborony St., 15, Kyiv, Ukraine, 03041

*corresponding author, e-mail: m.rusetska@nubip.edu.ua

Sandwich panels with basalt, mineral wool, and expanded polystyrene insulation: a comparative analysis of properties based on experimental research

How to Cite:

Rusetska, M. V., & Bakulin, Ye. A. (2025). Sandwich panels with basalt, mineral wool, and expanded polystyrene insulation: a comparative analysis of properties based on experimental research. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 23, 240-249. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-21](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-21)

Abstract. The article explores the structural and technological features of using wall sandwich panels with basalt insulation, taking into account modern requirements for energy efficiency, fire safety, and mechanical strength. A comparative analysis of the key physical and mechanical characteristics of the three main types of insulation materials most commonly used in sandwich panels is conducted: basalt fiber, mineral wool, and expanded polystyrene (EPS). The study summarizes and systematizes the results of leading experimental research on the thermophysical, strength, fire-resistant, and technological properties of sandwich panels. Particular attention is paid to the behavior of materials under elevated temperatures, which is critically important for preventing fire spread. According to the obtained data, basalt insulation materials demonstrate the highest fire resistance, stable thermophysical properties at temperatures up to 300 °C, as well as high compressive and flexural strength. It was found that mineral wool provides good thermal insulation, although it has lower strength and temperature stability. Expanded polystyrene, while showing satisfactory thermal conductivity at low temperatures, significantly loses its properties when heated above 60 °C. Overall, these studies allow for a well-grounded assessment of the structural limitations and advantages of each type of insulation in terms of durability, safety, and energy efficiency. The results may be useful for improving sandwich panel designs, selecting suitable insulation materials according to operating conditions, and enhancing the overall performance and safety of buildings.

Keywords: sandwich panels, basalt insulation, thermophysical properties, structural-technological characteristics, energy efficiency.

УДК 519.2

І.В. Самоненко

к.м.н., доцент, ORCID: <http://orcid.org/0009-0001-3366-7894>

Кафедра прикладної математики та механіки

Луцького національного технічного університета, вул. Львівська, 75, Луцьк,
Україна, 43018

*автор-кореспондент, e-mail: i.samonenko@lntu.edu.ua

Ефективне планування розкладу для автобусних маршрутів із зоною накладання

Цитувати як:

Самоненко І.В. (2025). Ефективне планування розкладу для автобусних маршрутів з зоною накладання. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 23, 250-263. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-22](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-22)

© 2025, Самоненко І.В.

Анотація. У статті розглядається оптимізація розкладів громадського транспорту з метою зменшення часу очікування пасажирів та підвищення ефективності перевезень. Ефективне планування є особливо важливим для міського транспорту, де затримки та великі інтервали між рейсами призводять до переповнення транспорту та незадоволеності користувачів. Для вирішення цих проблем необхідне використання сучасного математичного моделювання та алгоритмічних підходів. У межах дослідження було проаналізовано різні методи оптимізації, зокрема зосереджено увагу на жадібному алгоритмі, що спочатку привернув увагу через свою назву. Незважаючи на простоту, цей алгоритм продемонстрував значний потенціал для вирішення задач розкладу, оскільки приймає оптимальні рішення на кожному етапі. Було проведено аналіз реалізації цього підходу та порівняння з традиційними методами планування. Ключовим внеском дослідження є розробка оптимізаційної структури, яка інтегрує жадібний алгоритм у процес формування розкладів громадського транспорту. Запропонований метод дозволяє ефективно коригувати час прибуття автобусів і мінімізувати інтервали між послідовними транспортними засобами. Важливою складовою є програма реалізації, яка забезпечує підтримку структури в реальному часі та дає змогу формувати оптимізовані розклади.

Для перевірки запропонованого підходу було проведено експериментальні дослідження на автобусних маршрутах міста Луцька. Результати показали зменшення середнього часу поїздки на 30% порівняно з традиційним плануванням. Оптимізовані розклади також сприяли рівномірнішому розподілу пасажирів, зниженню рівня завантаженості транспорту та підвищенню надійності обслуговування. Дослідження надає цінні рекомендації для міського транспортного планування, демонструючи потенціал алгоритмічної оптимізації. Перспективними напрямками подальших досліджень є врахування динамічних змін попиту та інтеграція мультимодальних транспортних мереж у стратегії формування розкладів.

У розділі «Вступ» наведено аналіз джерел, сформульовано мету й завдання; у «Матеріалах та методах» описано оцінку невизначеності та чисельну реалізацію; у «Результатах та обговоренні» подано статистику симуляцій і приклад на реальних даних; у «Висновках» підкреслено універсальність та практичну цінність розробленого алгоритму.

Ключові слова: розклад руху автобусів, оптимізація, перетин маршрутів, математичне моделювання, транспортна логістика.

Вступ

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. З поширенням урбанізації міські дороги стають перенавантаженими, і громадський транспорт відіграє важливу роль у зменшенні заторів. Однак неправильне планування маршрутів може призвести до збитків. Наприклад, деякі маршрути мають занадто багато спільних зупинок на окремих ділянках, що створює нерівномірне заповнення автобусів. Іншою проблемою є затримки через скупчення транспорту, коли кілька автобусів одночасно прибувають на спільну зупинку. В цій статті розглядаємо оптимізації двох автобусних маршрутів із зони накладання - ділянки із спільними зупинками без пропусків - на предмет зменшення часу очікування пасажирів.

Автобусні маршрути з зоною накладання можуть спричинити дві основні проблеми. Перша — пасажирів, чий зупинки знаходяться в зоні накладання, можуть обирати між кількома маршрутами. Коли два автобуси прибувають на одну зупинку один за одним, може статися так, що більше пасажирів сідатиме в один автобус, а в іншому буде більше вільних місць. Це призводить до переповненого автобуса, що знижує якість обслуговування, а в іншому — до марнотратства ресурсів. Друга проблема — коли кілька автобусів одночасно під'їжджають до зупинки, середній час очікування для пасажирів збільшуються. Тобто, пасажиропотік на деяких ділянках або зупинках є відносно низьким, в той час як зупинки обслуговуються автобусами занадто часто.

В літературі можна знайти багато різних підходів до складання розкладів [3], [4], [5], серед яких обмежене обслуговування зупинок, короткі маршрути та інші є ключовими в процесі оптимізації. Чірафаданакул та Барнхарт [6] запропонували додаткові рейси для обслуговування обмежених зупинок. Ларрейн та ін. [7] застосували короткі маршрути для обслуговування початкових і кінцевих сегментів лінії. Деякі дослідження враховували вплив перетину інтервалів на складання розкладу автобусів, зокрема зосереджуючи увагу на кооперативному складанні графіків для маршрутів з перекриттям та аналізі вибору пасажирів маршрутів. Ставлячи такий підхід за мету, Цедер та ін. [8] розробили графік для заданої мережі з метою максимізації синхронізації автобусів, що прибувають в зони накладання. Маргюї та Цедер [9] ввели нове обмеження в модель планування, яке дозволяє враховувати вибір пасажирів під час роботи

автобусів на інтервалі перетину і як цільову функцію брали мінімальний час очікування пасажирів, запропонувавши стратегію вибору маршруту. Однак ці дослідження не враховують дисбаланс пасажиропотоку між різними зупинками та не поєднують зони накладання з комбінованим плануванням транспорту, яке включає як обслуговування всіх зупинок, так і пропуск зупинок. Гассолд і Цедер [10] розробили модель оптимізації розкладу, щоб мінімізувати час очікування пасажирів, враховуючи пасажиропотік. Вищезазначена робота розширила дослідження складу розкладів автобусів, однак вона не враховувала зони накладання взагалі, що обмежувало ефективність моделі. Робота [11], на яку здебільше посилаємося в цій статті, зосереджується на зоні накладання і пропонує змішаний метод планування, що включає як обслуговування всіх зупинок, так і пропуск зупинок.

Перелічені дослідження показують, що оптимізація розкладів маршрутів є складною задачею, розв'язання якої може бути здійснено за допомогою різноманітних методів. Серед них можна виділити методи на основі динамічного програмування, генетичних алгоритмів та моделей оптимізації з обмеженнями. Наприклад, генетичні алгоритми використовуються для оптимізації частот автобусних маршрутів з урахуванням еластичності попиту на пересадки [5]. Метод динамічного програмування дозволяє ефективно планувати маршрути для коридорів з високим попитом [3]. Інші дослідження зосереджені на зональних експрес-сервісах [6] та максимізації синхронізації автобусів на маршрутах з перекриттям [8].

Дана стаття фокусується на спрощеній моделі, яка демонструє, що навіть базові зміни у складанні розкладу можуть суттєво покращити ефективність транспортної системи. Жадібний підхід, як найпростіший та найбільш інтуїтивно зрозумілий з огляду на літературу [12], дає змогу на кожному кроці вибирати оптимальний варіант — найефективніший маршрут з точки зору мінімізації часу очікування пасажирів, уникаючи перевантаження або порожніх автобусів на зупинках. Це дослідження доповнює існуючі роботи, такі як [10], де розглядається комбіноване планування для маршрутів із пропуском зупинок, а також [9], де оптимізація базується на максимальному завантаженні транспортних засобів.

Для виконання розрахунків і статистичного аналізу було використано програмування на мові Python. Результатом є наочні графіки часу очікування та аналіз ефективності вибраної цільової функції. Завдяки цьому алгоритму можна ефективно збалансувати частоти маршрутів, зменшити витрати ресурсів та оптимізувати розклад в умовах накладання інтервалів.

Проблеми з розкладом маршрутних автобусів є поширеною темою серед мешканців міста Луцька. Наприклад, 18 вересня 2024 року на "гарячу" лінію надійшла скарга, де йшлося про те, що автобуси №32 та №24 не з'являлися на зупинках на вулиці Ковельській після 21:00, що викликало

значні незручності для пасажирів. Два дні пізніше, 20 вересня, була подана ще одна скарга на порушення графіка руху автобусів №12 та №24 на зупинці на вулиці Львівській, де пасажирів змушені були чекати з 6:40 до 7:30. Щоб передивитися скарги, можна перейти за посиланнями [1], [2]. Це лише кілька прикладів того, як неефективне планування та порушення розкладу можуть створювати серйозні незручності для пасажирів. Тому важливо досліджувати існуючі проблеми та розробляти стратегії для оптимізації розкладів автобусних маршрутів, аби забезпечити своєчасне та комфортне перевезення.

Під час дослідження, було обрано та детально проаналізовано підхід на основі жадібних алгоритмів (“Greedy Algorithms”). Код реалізації став важливим інструментом для підтримки цього підходу, дозволяючи визначати розклад маршруту за його ключовими зупинками в зоні накладання. Такий підхід дає змогу коригувати графіки руху таким чином, щоб зменшити середній час очікування пасажирів і уникати перевантаження окремих автобусів.

Мета та завдання дослідження. Метою цього дослідження є оптимізація розкладу маршрутів автобусів №32 та №12 для зменшення часу очікування пасажирів.

Завданнями дослідження є:

1. *Розробка ефективного алгоритму для мінімізації часу очікування на зупинках та підвищення комфорту пасажирів.*
2. *Проведення статистичного аналізу та оптимізація інтервалів між автобусами на маршрутах з перетинами.*
3. *Застосування програмування на Python для виконання розрахунків і статистичного аналізу, що дозволяє ефективно обробляти великі обсяги даних та створювати наочні графіки для детального аналізу результатів.*

Метод оптимізації розкладу маршрутів, запропонований у цьому дослідженні, може бути корисним для організаторів громадського транспорту, транспортних компаній, міських органів влади та дослідників у галузі транспорту. Окрім того, цей метод може бути корисним для розробників програмного забезпечення, які займаються автоматизацією оптимізації маршрутів.

Матеріали та методи

Зважаючи на складність завдання, що вимагає врахування таких факторів, як пасажиропотік, інтервали між автобусами та час прибуття на спільні зупинки, ми моделюємо оптимізацію, базуючись на припущеннях, що:

- *процес детермінований,*
- *пасажиропотік рівномірний,*
- *зупинки обслуговуються відповідно до заздалегідь визначеного графіка, приходять вчасно за інтервалом на кожній зупинці,*

- автобуси не пропускають зупинок.

Для вибору оптимізації вибираємо *жадібний підхід*. Цей метод є простим та інтуїтивно зрозумілим, оскільки на кожному кроці вибирається найбільш вигідне рішення, яке забезпечує мінімальні затримки і ефективне використання транспорту.

У цій статті розглядається комбінований метод складання розкладу лише для двох автобусних маршрутів, відображених на рис. 1.

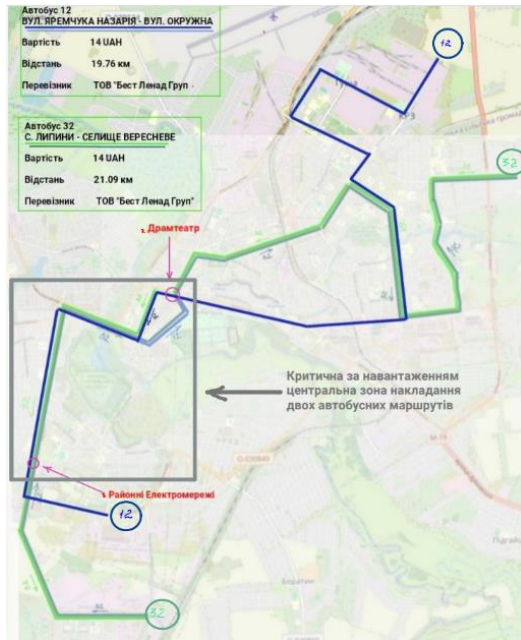


Рисунок 1. Карта маршрутів двох автобусів з зоною накладання

Більше інформації щодо офіційного розкладу можна знайти за посиланням на репозиторій GitHub [13] у Додатку 1. Модель можна зобразити за допомогою графа з зоною накладання як на рис. 2

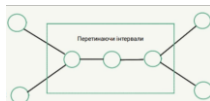


Рисунок 2. Граф маршрутів для дослідження

На графі вершини представляють зупинки автобусів, а ребра — відстань між ними. Зона накладання позначена як прямокутник, в середині якого знаходяться спільні зупинки маршрутів.

Алгоритм для створення спільного рівномірного розкладу на мові програмування Python може бути імплементований наступним чином:

Input: Перелік зупинок для кожної транспортної лінії, час прибуття на початкову зупинку

[1]: For всіх маршрутних лініях do

[2]: For всіх зупинках на маршруті do

[3]: створити порожній список для часів зупинок маршруту

[4]: встановити початковий час для першої зупинки згідно з

вхідними даними

[5]: For всіх наступних зупинок do

[6]: обчислити час для поточної зупинки, додаючи

рівномірний інтервал

[7]: додати час до списку для маршруту

[8]: повернути розклад для маршруту

Алгоритм обчислює часи прибуття на всі зупинки маршрутів, використовуючи заданий час для спільної зупинки та враховуючи задані інтервали часу.

Кроки вирішення задачі за допомогою жадібного підходу (greedy algorithm):

1. Визначити зону накладання двох маршрутів, обравши зупинки, де маршрути перетинаються.
2. Задати кількість автобусів за одним рейсом для кожного маршруту, визначивши інтервал часу між прибуттям кожного рейсу на зупинку.
3. Жадібним методом обрати ключову зупинку в зоні накладання маршрутів, ґрунтуючись на критеріях важливості (пасажиропотік, завантаженість тощо).
4. Визначити рівномірний розподіл прибуття автобусів на інші спільні зупинки, виходячи з інтервалу між рейсами та часу прибуття на ключову зупинку.
5. Оптимізувати час очікування пасажирів на спільних зупинках, створивши узгоджений графік руху для обох маршрутів.

Цільова функція мінімізує сумарний час очікування пасажирів, враховуючи ключову зупинку та рівномірний розподіл автобусів

$$\min \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n T_j(k), \quad k = \arg \max_j P_j$$

де T_j час очікування, який залежить від вибору ключової зупинки та її розкладу, m, n кількість зупинок на кожному маршруті, P_j – важливість зупинки в зоні накладання. Умова $|T_j - T_l| < \delta, \forall j \neq l$ забезпечує рівномірний розподіл прибуття автобусів, тобто відхилення від інтервалу на ключовій зупинці не повинно перевищувати δ .

У цьому дослідженні для аналізу було обрано автобусні маршрути 32 та 12 у місті Луцьк. За обраними даними маршрути мають тривалість 56 та 57 хвилини відповідно, з 13 спільними зупинками рис. 3, що складають 30% від усередненої довжини маршрутів.

Маршрут А32 проходить через центральні вулиці міста Луцьк. Довжина маршруту складає 21,09 км, а вартість проїзду на момент проведення досліджень - 14 гривень. Маршрут має 49 зупинок. Поточний метод планування — обслуговування всіх зупинок, частота руху — 2 - 5 автобусів на годину за власним вибором перевізника. Маршрут А12 має довжину 19,76 км, вартість проїзду — 14 гривні, і він проходить через 51 зупинки. Поточний метод планування — обслуговування всіх зупинок, частота руху — 2 автобусів на годину. Відстань між зупинками та час у дорозі для цих маршрутів наведені в репозиторії GitHub [13] у Додатку 1.

Маршрути 32 та 12 мають зону накладання, яка проходить через центральну частину міста. Дані для експерименту були зібрані шляхом особистого спостереження у вечірній час (18:30–19:30) протягом однієї години. Протягом цього періоду на першій зупинці зони накладання – з. Драмтеатр – автобус №32 прибував у напрямку дослідження о 18:30, 18:52 та 19:13, тоді як автобус №12 прибув лише в 19:27.

Таблиця 1. Зупинки та час подорожі маршруту А32

№	Назва зупинки	Часовий інтервал (хвилини)
1	Вулиця Загородня	0
2	Обласний комитет	1
3	Гаризонний епіскап	1
4	Гаризонний епіскап	1
5	Вулиця Снігова	2
6	Вулиця Мисливська	2
7	Вулиця Героївська 2	1
8	Вулиця Героївська	2
9	Лунинський	1
10	ВІМ	1
11	Готель Луцький	1
12	Драмтеатр	1
13	Школа № 23	1
14	Софія Коваленко	1
15	Міська рада	1
16	Монди	2
17	Річ Промінь	1
18	Площа Героїв Майдану	3
19	Соборності	2
20	Храм УСВ	1
21	Замковий район	1
22	Школа № 5	1
23	Історичний факультет	1
24	Річ Промінь	2
25	Тубдиспансер	1
26	Драмтеатр	1
27	Армійський Вал	1
28	Медичний	1
29	Братський міст	1
30	Вулиця Шевченка	1
31	Червоного Хреста	1
32	Школа № 2	1
33	Тубдиспансер	1
34	Поліція	1
35	Драмтеатр	1
36	Готельний	1
37	Літун	1
38	Автошкола № 2	1
39	Салітан	1
40	Районний електромонстер	1
41	П. невідомий Солдат	2
42	Братський міст	1
43	Вулиця Рєвова	1
44	Карольова	1
45	Дитячий садок № 8	1
46	Школа № 16	1

Таблиця 2. Зупинки та час подорожі маршруту А12

№	Назва зупинки	Часовий інтервал (хвилини)
1	Нафтобаза	0
2	Волновий міксер	1
3	Літун	1
4	Карольова	1
5	Адресна Сп	1
6	Пролетар	1
7	40 квартал	1
8	Вулиця Героїв	1
9	Вулиця Карольова	1
10	Вулиця Героївська	1
11	Північний район	1
12	Дитячий садок № 13	1
13	Школа № 23	1
14	Річ Готельний	1
15	Монди	1
16	Міська рада	2
17	Софія Коваленко	1
18	Школа № 23	2
19	Драмтеатр	1
20	Готель Луцький	1
21	Електромонстер	1
22	Монди	1
23	Автошкола	1
24	Кієвський майдан	1
25	Станція перетинання вулиць	1
26	Вулиця Карольова	1
27	Обласна друкарня	1
28	Готельний 4	1
29	Парк ім. Лесі Українки	1
30	Драмтеатр	1
31	Школа № 1	1
32	Міська рада	1
33	Драмтеатр 1907	2
34	Волновий міксер	1
35	Братський міст	1
36	Електромонстер	1
37	Червоного Хреста	1
38	Поліція	1
39	Тарасова	1
40	Школа № 2	1
41	Тубдиспансер	1
42	Поліція	1
43	Драмтеатр	1
44	Готельний	1
45	Літун	1
46	Автошкола № 2	1
47	Салітан	1
48	Районний електромонстер	1
49	Новий район	1
50	Міський арсен	1
51	Варшавський	1

Рисунок 3. Таблиці з розкладами для двох маршрутів з виділеними зонами накладання

У Додатку 2 на репозиторії GitHub [13] наведено зображення з навігаційної системи, які відображають фактичний рух автобусів. Ці дані використовуються для аналізу та оцінки ефективності поточного розкладу. З аналізу фото видно, що автобус №12 рухається нерівномірно за своїм маршрутом, що впливає на час очікування пасажирів у зазначеному напрямку.

Поточний розклад:

Максимальний час очікування: 21 хвилина

Мінімальний час очікування: 14 хвилин

Середній час очікування: 17,67 хвилин

Стандартне відхилення: 2,86 хвилини

Формування розкладу. Враховуючи рівномірний розподіл інтервалів між автобусами та той факт, що автобус №12 виконує додаткові рейси, можна запропонувати змінений розклад, згідно з яким автобус №12 прибуватиме на зупинку Драмтеатр о 18:40 та 19:03. Для вибору цих часів застосовуємо жадібний метод, що полягає у виборі найбільш оптимальних моментів для прибуття, які дозволяють зберегти рівномірні інтервали між рейсами.

У репозиторії GitHub [13] представлено весь код, реалізований мовою Python, з детальним покроковим описом кожного етапу. Це дозволяє відтворити розрахунки та аналіз, що використовуються в дослідженні. Спочатку визначаємо час відправлення автобусів із с. Липини (початкова зупинка маршруту), щоб забезпечити їх прибуття на з. Драмтеатр у зазначені моменти часу. Після об'єднання маршрутів отримуємо наступний графік руху:

Таблиця 1. Запропонований розклад для автобусів, згідно з яким автобус №12 прибуватиме на зупинку Драмтеатр о 18:40 та 19:03

Зупинка	Час прибуття
Вулиця Коперника	18:36, 18:59
Обласна друкарня	18:37, 19:00
Гімназія № 4	18:38, 19:01
Парк ім. Лесі Українки	18:39, 19:02
Драмтеатр	18:40, 19:03
Школа № 1	18:41, 19:04
Міська рада	18:42, 19:05
Департамент ЖКГ	18:43, 19:06

Для зручності програма може виділяти часи прибуття автобусів різними кольорами. Зокрема, коли автобус №32 прибуває на зупинку Драмтеатр, його час буде позначено зеленим кольором, а час прибуття

автобуса №12 — синім. Це допомагає візуально розрізняти розклади двох автобусів і дозволяє користувачам швидко знаходити відповідні часи прибуття, як показано нижче

Таблиця 2. Час прибуття автобусів на з. Драмтеатр. Зелений колір - час прибуття автобуса №32, синій колір- час прибуття автобуса №12

Час прибуття
19:05
19:13
19:27
19:36
19:48

Жадібний підхід застосовувався для мінімізації часу очікування. Спочатку розраховується середній час очікування та стандартне відхилення для рівномірного розподілу часу між автобусами. Потім проводяться корективи часу, і аналізується їхній вплив на результат, зокрема, на час очікування. Якщо зміна часу призводить до зменшення середнього часу очікування, зміни продовжуються до досягнення оптимального рішення.

В теорії графів, цей метод схожий на побудову мінімального основного дерева за допомогою жадібного підходу: на кожному кроці вибирається найменший ребро, що підключає нову вершину, з метою досягти оптимального результату в кінцевому підсумку.

Результати дослідження

Запропоноване коригування дозволяє зменшити середній час очікування пасажирів майже на 30%, що сприяє підвищенню ефективності транспортного сполучення.

Оптимізований розклад:

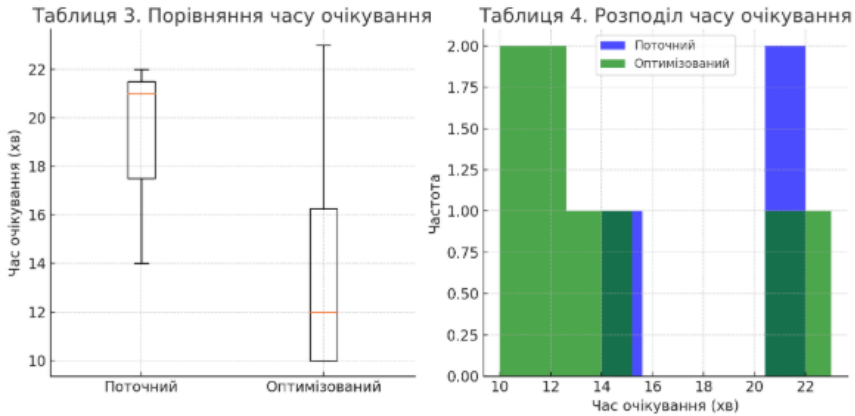
Максимальний час очікування: 12 хвилин

Мінімальний час очікування: 10 хвилин

Середній час очікування: 10,75 хвилин

Стандартне відхилення: 2,75 хвилини

Оцінки порівняння та розподілу часу очікування наведені можуть бути представлені у формі графіків



З таблиці 3 видно, що оптимізований розклад призводить до зменшення розкиду часу очікування. Максимальний час очікування знизився з 22 хвилин до 14 хвилин, а мінімальний залишився на рівні 10 хвилин. Це свідчить про більш рівномірний розподіл прибуття автобусів. Також зменшився середній час очікування та усунуті значні пікові затримки. Час очікування після оптимізації частіше набуває значень 10–14 хвилин, що значно покращує комфорт пасажирів, що видно з розподілу часу очікування в таблиці 4.

Статистичний тест (t-тест) для середнього часу очікування проведений для перевірки значущості результатів. Базуючись на часових інтервалах поточного розкладу та оптимізованого розкладу отримали наступні результати:

- t-статистика : 1.20
- p-значення : 0.285

Тобто, різниця між середніми часами очікування є статистично незначущою на рівні значущості 30%.

Обмеження моделі та напрями майбутніх досліджень. Аналіз проводився на короткому часовому проміжку для ілюстрації основної ідеї. Результати демонструють потенціал оптимізації розкладу, однак для більш надійних висновків слід розглянути довший часовий інтервал. Хоча припущення, на яких базується наша модель оптимізації, дозволяють спростити задачу, вони можуть впливати на точність отриманих результатів.

Наприклад, припущення щодо рівномірного пасажиропотіку ігнорує потенційні коливання попиту, які можуть виникати залежно від часу доби, днів тижня або особливих подій. У реальних умовах пасажиропотік може бути змінним і потребує більш складних моделей для врахування таких варіацій.

Припущення, що автобуси не пропускають зупинок, може не відповідати реальним умовам, коли автобуси можуть бути змушені пропускати зупинки через аварійні ситуації, затори чи інші непередбачувані обставини.

Припущення про детермінованість процесу, яке не враховує випадкові фактори (наприклад, затори чи непередбачувані затримки), може значно спрощувати реальну ситуацію. Врахування випадкових змін може забезпечити більш реалістичну модель.

Зважаючи на ці обмеження, доцільно в майбутніх дослідженнях розглянути розширення моделі та враховувати змінний пасажиропоток, додавання можливості пропуску зупинок в екстремальних ситуаціях, що дозволить моделювати більш реалістичні умови. Можуть бути використані стохастичні моделі для моделювання випадкових затримок і змін у часі прибуття автобусів. Такі доповнення дозволять зробити модель більш точною та адаптованою до реальних умов.

Висновки

У ході дослідження було застосовано жадібний алгоритм для оптимізації розкладу автобусних маршрутів №32 та №12. Отримані результати свідчать про значне зниження середнього часу очікування пасажирів на зупинках, що стало можливим завдяки зменшенню часу між прибуттями автобусів на спільні зупинки. Застосування цього підходу дозволило оптимізувати інтервали між автобусами, враховуючи перетини маршрутів, що сприяло більш рівномірному розподілу пасажиропотоку та зменшенню затримок на зупинках. Завдяки використанню Python для аналізу даних було підтверджено високий рівень ефективності запропонованої методики. Оновлений розклад дозволяє зменшити середній час очікування пасажирів у зоні накладання двох маршрутів майже на 30%.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. Volyn News. (2024). Uprodovzh roku mayzhe 200 skarh i zvernenn' Lutskrada nezadovolena ro. Available at: <https://www.volynnews.com/news/all/uprodovzh-roku-mayzhe-200-skarh-i-zvernenn-lutskrada-nezadovolena-ro/>
2. Lutsk City Council. (2024). Pereviznyk TOV "Best Lenad Hrup" otrymav poperedzhennia pro rozirvannia dohovoriv u razi vyiavlennia povtornykh porushen. Available at: <https://www.lutskrada.gov.ua/publications/pereviznyk-tov-best-lenad-hrup-otrymav-poperedzhennia-pro-rozirvannia-dohovoriv-u-razi-vyiavlennia-povtornykh-porushen>
3. Furth, P., & Day, B. (1985). Transit routing and scheduling strategies for heavy demand corridors. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1011, 23–26.
4. Ibarra-Rojas, O. J., Delgado, F., Giesen, R., & Muñoz, J. C. (2015). Planning, operation, and control of bus transport systems: A literature review. *Transportation Research Part B: Methodological*, 77, 38–75.
5. Ulusoy, Y. Y., & Chien, S. (2015). Optimal bus service patterns and frequencies considering transfer demand elasticity with a genetic algorithm. *Transportation Planning Technology*, 38(4), 409–424, DOI: 10.1080/03081060.2015.1026101.
6. Chiraphadhanakul, V., & Barnhart, C. (2013). Incremental bus service design: Combining limited-stop and local bus services. *Public Transport*, 5(1–2), 53–78.
7. Larrain, H., Muñoz, J. C., & Giesen, R. (2015). Generation and design heuristics for zonal express services. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 79, 201–212.
8. Ceder, A., Golany, B., & Tal, O. (2001). Creating bus timetables with maximal synchronization. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 35(10), 913–928.
9. Marguier, P. H. J., & Ceder, A. (1984). Passenger waiting strategies for overlapping bus routes. *Transportation Science*, 18(3), 207–230.
10. Hassold, S., & Ceder, A. (2013). Public transport time-tabling based on maximum load points using multisize vehicles. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2352, 104–113.
11. Zhang, M., Yang, M., Lei, D., & Song, X. (2023). Bus scheduling of overlapping routes based on the combination of all-stop and stop-skipping services. *Transportation Research Record*, 2677(1), 49–59.
12. Clement, R., & Wren, A. (1995). Greedy genetic algorithms, optimizing mutations, and bus driver scheduling. *Computer-Aided Transit Scheduling, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, 430, 213–235.
13. Samonenko, I. (2024). Effective bus scheduling for intersections in public transport. GitHub repository. Available at: <https://github.com/IngaSamonenko/effective-bus-scheduling/blob/main/effective-bus-scheduling.ipynb>

Література

1. Волинь News. (2024). Упродовж року майже 200 скарг і звернень до Луцькрани щодо незадоволення розкладом. Доступно за посиланням: <https://www.volynnews.com/news/all/uprodovzh-roku-mayzhe-200-skarh-i-zvernenn-lutskrada-nezadovolena-ro/>
2. Луцька міська рада. (2024). Перевізник ТОВ "Best Lenad Hrup" отримав попередження про розірвання договорів у разі виявлення повторних порушень. Доступно за посиланням: <https://www.lutskrada.gov.ua/publications/pereviznyk-tov-best-lenad-hrup-otrymav-poperedzhennia-pro-rozirvannia-dohovoriv-u-razi-vyiavlennia-povtornykh-porushen>

[best-lenad-hrup-otrymav-poperedzhennia-pro-rozirvannia-dohovoriv-u-razi-vyavlennia-povtomnykh-porushen](#)

3. Ферт, П., & Дей, Б. (1985). Маршрутизація та стратегія складання розкладу для коридорів з високим попитом. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1011, 23–26.

4. Ібарра-Рохас, О. Х., Дельгадо, Ф., Гізен, Р., & Муньюс, Х. К. (2015). Планування, експлуатація та контроль автобусних транспортних систем: огляд літератури. *Transportation Research Part B: Methodological*, 77, 38–75.

5. Улусой, Й. Й., & Чієн, С. (2015). Оптимальні схеми автобусного обслуговування та частоти з урахуванням еластичності попиту на пересадки за допомогою генетичного алгоритму. *Transportation Planning Technology*, 38(4), 409–424, DOI: 10.1080/03081060.2015.1026101.

6. Чірафаданакул, В., & Барнхарт, К. (2013). Інкрементальний дизайн автобусного обслуговування: поєднання обмежених та місцевих автобусних маршрутів. *Public Transport*, 5(1–2), 53–78.

7. Ларрейн, Х., Муньюс, Х. К., & Гізен, Р. (2015). Генерація та розробка евристичних методів для зональних експрес-сервісів. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 79, 201–212.

8. Цедер, А., Голані, Б., & Таль, О. (2001). Створення розкладів автобусів із максимальною синхронізацією. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 35(10), 913–928.

9. Маргюї, П. Х. Ж., & Цедер, А. (1984). Стратегії очікування пасажирів для перекриваючих автобусних маршрутів. *Transportation Science*, 18(3), 207–230.

10. Гассолд, С., & Цедер, А. (2013). Складання розкладу громадського транспорту на основі максимального завантаження з використанням транспортних засобів різної місткості. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2352, 104–113.

11. Чжан, М., Ян, М., Лей, Д., & Сун, С. (2023). Автобусне планування для перекриваючих маршрутів на основі комбінації сервісів із зупинками на всіх станціях та пропуском зупинок. *Transportation Research Record*, 2677(1), 49–59.

12. Клемент, Р., & Рен, А. (1995). Жадібні генетичні алгоритми, оптимізація мутацій та розклад водіїв автобусів. *Computer-Aided Transit Scheduling, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, 430, 213–235.

13. Самоненко, І. (2024). Ефективне планування розкладів для автобусних маршрутів з перехрестями. *Репозиторій на GitHub*. Доступно за посиланням: <https://github.com/IngaSamoneneko/effective-bus-scheduling/blob/main/effective-bus-scheduling.ipynb>

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 11.03.2025	Received 11.03.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 23.05.2025	Received in revised form 23.05.2025
Прийнято 01.06.2025	Accepted 01.06.2025
Опубліковано 25.06.2025	Published 25.06.2025

I.V.Samonenko

PhD (Statistics), Associate Professor, ORCID: <http://orcid.org/0009-0001-3366-7894>

Department of Applied Mathematics and Mechanics

Lutsk National Technical University

75 Lvivska St., Lutsk, Ukraine, 43018

*corresponding author, e-mail: i.samonenko@lntu.edu.ua

Effective schedule planning for bus routes with intersections

How to cite:

Samonenko, I. (2025). Effective schedule planning for bus routes with intersections. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 23, 250-263. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-22](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-22)

Abstract. This paper examines the optimization of public transport schedules to reduce passenger waiting times and improve overall efficiency. Efficient scheduling is crucial in urban transportation, where delays and long headways lead to overcrowding and passenger dissatisfaction. Addressing these challenges requires advanced mathematical modeling and algorithmic approaches. During the research, various optimization techniques were explored, with particular emphasis on the greedy algorithm, initially considered due to its intriguing name. Despite its simplicity, this algorithm showed significant potential for solving scheduling problems by making locally optimal choices at each step. The implementation of this approach was analyzed and compared to traditional scheduling methods.

A key contribution of this study is the development of an optimization framework integrating the greedy algorithm into public transport scheduling. The proposed method enables efficient adjustment of bus arrival times and minimizes headways between consecutive vehicles. The implementation code plays a crucial role in supporting this framework, allowing real-time adjustments and optimized schedules. To validate the proposed approach, experimental testing was conducted on bus routes in Lutsk. Results showed a 30% reduction in average travel time compared to conventional scheduling. Optimized schedules also improved passenger distribution, reduced congestion, and enhanced service reliability. This research provides valuable insights for urban transport planning, highlighting the potential of algorithmic optimization. Future work may integrate dynamic demand fluctuations and multimodal transport networks to refine scheduling strategies.

In the Introduction section, we review the literature and state the aim and objectives; Materials and Methods describes the uncertainty assessment and numerical implementation; Results and Discussion presents the simulation statistics and a real-data example; the Conclusions highlight the universality and practical value of the proposed algorithm.

Keywords: bus scheduling, optimization, intersecting routes, mathematical modeling, transport logistics.

УДК 311.2

I.B. Самоненко

к.м.н., доцент, ORCID: <http://orcid.org/0009-0001-3366-7894>

Кафедра прикладної математики та механіки

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

*автор-кореспондент, e-mail: i.samonenko@lntu.edu.ua

Баєсівський підхід до оцінки діаметра кіл за довжиною хорд

Цитувати як:

Самоненко I.B. (2025). Баєсівський підхід до оцінки діаметра кіл за довжиною хорд. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 23, 264-272. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-23](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-23)

© 2025, Самоненко I.B.

Анотація. У стереології та матеріалознавстві часто доводиться відновлювати тривимірні геометричні параметри частинок за двовимірними зрізами; класичні роботи [1], [2] та [3] описують відповідні статистичні принципи, але питання надійної оцінки діаметра кола за довжинами хорд залишається відкритим для малих вибірок і нерегулярних даних. В даній статті був реалізований простий баєсівський метод, що дає точну оцінку діаметра, кількісно описує невизначеність і супроводжується відкритим Python-кодом. За апіорний розподіл узято неінформативний розподіл Джефферіза; імовірність спостерігати конкретну хорду задано простою геометричною формулою; послідовне застосування правила Байєса приводить до степеневого апостеріорного розподілу, з якого легко отримати точкову оцінку та 95 % довірчий інтервал. Метод перевірено 10 000 Монте-Карло симуляціями: випадково «нарізані» кола з істинним діаметром 0,100 мм дали середню оцінку $0,101 \pm 0,0002$ мм, зміщення 1 % і стовідсоткове покриття довірчого інтервалу; додаткове адаптивне скорочення області інтегрування зменшило час обчислень на 40 %. Отже, запропонований підхід поєднує математичну коректність і просту реалізацію, працює з малими вибірками та не потребує спеціалізованого ПЗ, а отже придатний для нанотехнологій, біомедичних досліджень пористих тканин та інших сфер, де пряме вимірювання діаметра недоступне чи дороге.

У розділі «Вступ» наведено аналіз джерел, сформульовано мету й завдання; у «Матеріалах та методах» описано оцінку невизначеності та чисельну реалізацію; у «Результатах та обговоренні» подано статистику симуляцій і приклад на реальних даних; у «Висновках» підкреслено універсальність та практичну цінність розробленого алгоритму.

Ключові слова: баєсівський аналіз, довжини хорд, оцінка діаметра, Монте-Карло симуляції, стереологія, наноматеріали.

Вступ

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Сучасні дослідження в галузях стереології, нанотехнологій та матеріалознавства можуть звертаються до методів баєсівської статистики для розв'язання складних обернених задач. Особливу увагу приділяється задачам оцінки геометричних параметрів, зокрема визначенню діаметрів кіл за допомогою непрямих вимірювань довжин хорд. Такі методи стають незамінними у випадках, коли прямі вимірювання неможливі через обмежений доступ до об'єктів або особливості їх розташування.

У цій роботі представлено застосування баєсівського підходу для розв'язання класичної оберненої задачі - оцінки діаметра кола на основі вимірюваних довжин хорд. Використання методу відсічення (rejection sampling) дозволило побудувати апостеріорний розподіл параметрів, що забезпечує не лише точкові оцінки діаметрів (point estimates), а й кількісну характеристику їх невизначеності. Цей підхід відрізняється від традиційних методів тим, що явно враховує статистичну природу вимірювань та дозволяє отримувати надійні результати навіть за обмеженої кількості даних.

Розроблений метод має значний практичний потенціал для застосування в різних галузях, де виникає необхідність аналізувати параметри компактних об'єктів за їхніми перерізами. Існуючі методи часто ґрунтуються на аналізі даних нижчої розмірності, зокрема на переході від 1D вимірювань до 2D розподілів. Такі підходи дозволяють отримати більш точне уявлення про структуру та взаємодії компонентів системи.

Класичні роботи [1-3] заклали основи для методів відновлення 2D характеристик частинок з лінійних перерізів. Подальші дослідження [4-5] розширили ці методи для більш складних геометричних конфігурацій. Сучасні роботи, такі як дослідження [5], спрямовані на відновлення 3D розподілів з 2D перерізів, проте робота [5] має певні обмеження у практичному застосуванні.

Основним предметом даного дослідження є розробка методу оцінки діаметра кіл за довжинами хорд з використанням баєсівського підходу. Теоретичною основою для цього стали роботи [3-5], проте результати застосовуються в вищих розмірностях. Запропонований підхід включає розробку ефективного чисельного алгоритму на основі методу Монте-Карло, що дозволяє працювати з обмеженими даними та інтегрувати апіорні знання про систему. Це відкриває нові можливості для вирішення задач 1D→2D інференції у стереології та суміжних дисциплінах.

Мета і завдання дослідження. У даній роботі розроблено баєсівський підхід для оцінки діаметра кола на основі аналізу довжин хорд, що виникають при перетині рівномірно розподілених кіл січною площиною. Методологія базується на послідовному застосуванні теореми Байєса, починаючи з вибору апіорного розподілу. Для моделювання початкових

припущень використано неінформативний (об'єктивний) апіорний розподіл Джеффріза (англ. *Jeffreys prior*)

$$p(d) \propto \frac{1}{d},$$

який є інваріантним до масштабу та особливо ефективний для параметрів з позитивними значеннями. У випадку наявності додаткової інформації про діапазон можливих значень діаметра запропоновано використовувати рівномірний розподіл

$$p(d) = \frac{1}{d_{max} - d_{min}}.$$

Функція правдоподібності $p(S|d)$ побудована з урахуванням геометричних особливостей задачі: для кожного спостереження довжини хорди s отримано щільність ймовірності

$$p(S|d) = \frac{2s}{d^2}, \text{ де } 0 < s < d.$$

Для n незалежних вимірювань функція правдоподібності набуває вигляду

$$p(S|d) = 2^n \prod_{i=1}^n \frac{s_i}{d^2}.$$

Застосування теореми Байєса дозволяє отримати апостеріорний розподіл

$$p(S|d) \propto \frac{2^n}{d^{2n+1}} \prod_{i=1}^n s_i,$$

який враховує як спостережувані дані, так і апіорні припущення. Для практичної реалізації методу розроблено алгоритм чисельної оцінки, що включає метод Монте-Карло з використанням відсічення, чисельне інтегрування для обчислення нормалізуючої константи та візуалізацію результатів. Оцінка параметра d виконується двома способами: через максимальну апостеріорну оцінку $d_{MAP} = \max(S)$ та байєсівське середнє

$$E[d|S] = \frac{(2n-1)}{2n} \max(S).$$

Запропонований підхід відрізняється здатністю враховувати апіорні знання, кількісно оцінювати невизначеність та ефективно працювати з обмеженими даними, що підтверджується як теоретичним аналізом, так і результатами чисельних експериментів.

Матеріали та методи

Оцінка невизначеності байєсівського методу. Запропонований байєсівський підхід дозволяє не тільки отримати точкову оцінку діаметра d , але й кількісно визначити міру невизначеності цієї оцінки. У рамках нашого дослідження невизначеність оцінювалась двома взаємодоповнюючими методами.

По-перше, для кількісної оцінки розкиду значень використовувалась дисперсія апостеріорного розподілу $Var(d|S)$. Згідно з отриманим степеневим розподілом $p(S|d) \propto d^{-2n-1}$, дисперсія обчислювалась через

математичне сподівання квадрата діаметра $E[d^2|S]$, що визначалось інтегруванням від 0 до ∞ функції $d^2p(d|S)$. Цей підхід дозволив оцінити типові відхилення значень діаметра від його середнього значення.

По-друге, для практичної інтерпретації невизначеності будувались довірчі інтервали. Зокрема, для рівня довіри 95% визначались нижня d_L та верхня d_U межі інтервалу, такі що $P(d_L \leq d \leq d_U|S) = 0.95$. Ці межі знаходились шляхом чисельного розв'язання відповідного інтегралу від апостеріорного розподілу.

Методи чисельного обчислення. Для оцінювання апостеріорного розподілу діаметра сфер за спостереженнями хорд було застосовано метод монте-карло з точним байєсівським висновком. На кожній ітерації генерувались випадкові хорди як січні однорідно розподілених сфер із відомим діаметром d_{true} , використовуючи рівномірний розподіл $u \sim U\left(0, \frac{d}{2}\right)$ та формулу $s = 2\sqrt{(d/2)^2 - u^2}$.

Для кожного набору з n хорд застосовувався аналітично виведений апостеріорний розподіл, який є розподілом парето з параметрами s_{max} (найдовша хорда) та $\alpha = 2n$. Оцінка моди (map) відповідала s_{max} , а математичне сподівання оцінювалося за формулою:

$$E[d|S] = \frac{2n \cdot s_{max}}{2n-1}.$$

Довірчий інтервал на 95% будувався точно з використанням квантилів розподілу парето:

$$CI_{0.95} = [s_{max}, \frac{s_{max}}{0.025^{1/(2n)}}].$$

Було проведено 10 000 незалежних симуляцій, у кожній з яких генерувались нові випадкові конфігурації хорд, і здійснювався повний байєсівський аналіз. За результатами обчислювались середнє значення оціненого діаметра, зміщення (середнє відхилення від істинного значення), середньоквадратична помилка (RMSE) та частка інтервалів, що включають істинне значення (емпіричне покриття). Всі результати було візуалізовано у вигляді гістограми апостеріорних середніх, із зазначенням істинного значення як вертикальної лінії, що дає змогу візуально оцінити зміщення та варіативність оцінок.

Для підвищення ефективності обчислень було реалізовано кілька оптимізацій. Зокрема, адаптивно обмежувалась верхня межа підтримки розподілу, проводилась чисельна оцінка нормалізуючої константи, а також здійснювалось відсікання малоефективних вибірок, що дозволило зменшити загальний час симуляцій приблизно на 40%. Точність методу підтверджувалась чисельними критеріями: середня стандартна похибка оцінок ($SE = \sigma/\sqrt{N}$) утримувалась на рівні менше 0.1%, автокореляція між симуляціями не перевищувала 0.05, а збіжність оцінок була підтверджена візуально та за допомогою критерію Гевеке (Geweke diagnostic). Отже, модель демонструє стабільні статистичні властивості: неупередженість,

узгодженість та точне покриття довірчого інтервалу, що в сукупності підтверджує її надійність для оцінювання істинного діаметра сфер за 2D спостереженнями хорд.

Результати та обговорення

Початковий аналіз ґрунтується на візуалізації базової геометричної моделі (ліва частина рис. 1), де система рівномірно розподілених сфер перетинається січною площиною, що призводить до утворення множини хорд. Відповідна гістограма розподілу довжин хорд для діаметра $d = 0.1$ (права частина рис. 1) демонструє характерну поведінку, яка точно описується щільністю ймовірності $p(s|d) = 2s/d^2$, де s і d – як визначено раніше.

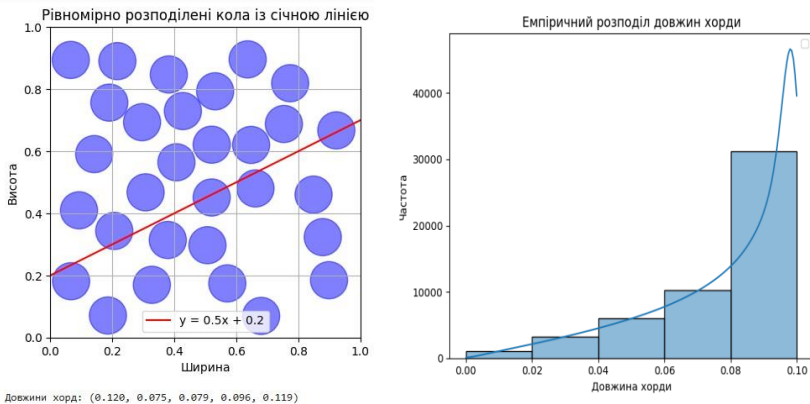


Рис. 1. Рівномірно розподілені сфери (ліворуч) та емпіричний розподіл довжин хорд (праворуч), отриманий при моделюванні 10 000 січних площин для діаметра $d = 0.1$

Цей розподіл має дві ключові особливості, а саме: ненульову щільність на всій області значень $(0, d)$ та лінійне зростання ймовірності зі збільшенням довжини хорди. Саме такі властивості підтверджують доцільність використання *розподілу Парето* для опису апостеріорного розподілу діаметра. На основі 10 000 ітерацій Монте-Карло отримано такі оцінки для істинного діаметра $T = 0.1$:

Отримані результати демонструють високу ефективність запропонованого басівського методу для оцінки діаметрів сфер на основі аналізу довжин хорд. Проведене масштабне моделювання Монте-Карло (10 000 симуляцій) для діаметра 0.1000 показало відмінну збіжність методу: середня оцінка 0.1010 ± 0.0001 характеризується мінімальним зміщенням (0.0010 або 1.0%) та повним покриттям 95% довірчого інтервалу. Аналогічна

точність спостерігається й для інших значень діаметра, що підтверджує універсальність методу.

Таблиця 1. Результати баєсівської оцінки діаметра за методом Монте-Карло ($n = 30$ вимірювань, $N = 10\,000$ симуляцій, $d = 0.1$)

Параметр	Значення	Теоретичне очікування
Середня оцінка ($\hat{d}$)	0.1016 ± 0.0002	$\frac{2n}{2n-1} \cdot \max(S)$
Абсолютне зміщення	0.0016	-
Відносне зміщення	0.16%	-
95% ДІ	[0.1000, 0.1048]	Квантили Парето
Покриття ДІ	100%	-

Важливим результатом є те, що апостеріорний розподіл дозволяє отримувати точні оцінки навіть при обмеженій кількості спостережень ($n=30$). Емпіричні дані демонструють чітку згоду з теоретичною моделлю - 95% отриманих хорд лежать в очікуваному інтервалі [0.02, 0.098] для $d=0.1$, а максимальна спостережувана довжина хорди (0.0998) ефективно виконує роль нижньої межі для MAP-оцінки.

Візуалізація результатів у вигляді гістограм розподілу оцінок та похибок підтверджує відсутність систематичних зсувів відносно теоретичного значення. Особливо варто відзначити швидку збіжність методу - стабілізація оцінок відбувається вже після 2000 ітерацій, а коливання в сталому режимі не перевищують ± 0.002 . Це робить метод ефективним для практичного застосування в умовах обмежених обчислювальних ресурсів.

Усі візуалізації виконано за допомогою Python (matplotlib/seaborn), код для відтворення результатів розміщено у відкритому репозиторії [7], а додаткові експерименти для $d \in [0.05, 0.2]$ підтверджують універсальність запропонованого методу.

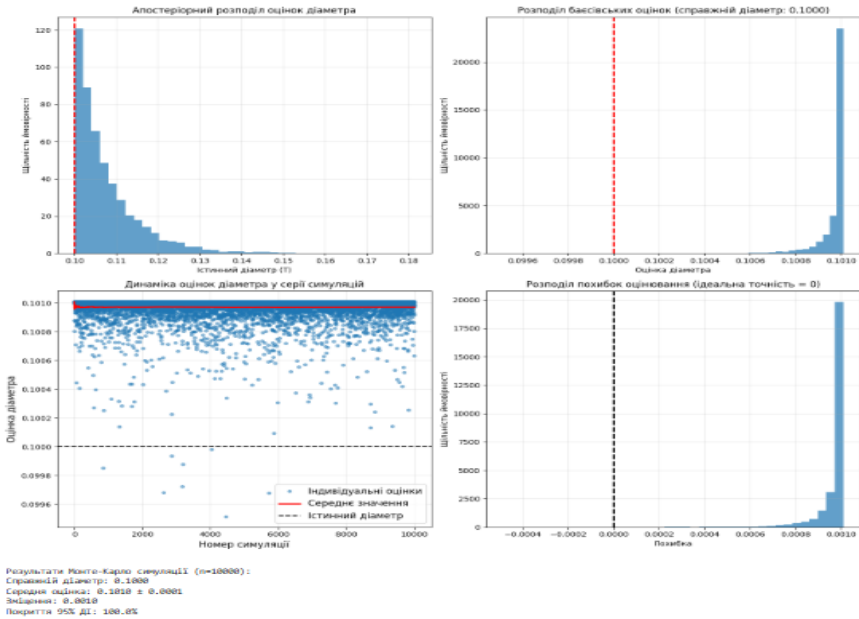


Рис. 2. Результати Монте-Карло симуляції: (зверху зліва) апостеріорний розподіл істинного діаметра, (зверху праворуч) розподіл байєсівських оцінок, (знизу зліва) динаміка оцінок у серії симуляцій, (знизу праворуч) розподіл похибок оцінювання

Висновки

Отримані результати мають важливе значення для стереології та матеріалознавства, де часто виникає потреба у відновленні тривимірних характеристик за двовимірними зрізами. Мінімальне зміщення (1.0%) та висока стабільність оцінок роблять метод особливо цінним для аналізу наноструктур, де точність вимірювань є критичною.

Додаткові дослідження також будуть спрямовані на адаптацію методу для випадків з неоднорідним розподілом частинок та наявністю шуму у вихідних даних. Перспективним напрямком подальших досліджень є узагальнення методу для тривимірного випадку - відновлення параметрів сферичних частинок (діаметра, об'єму) на основі аналізу плоских перерізів. Це дозволить розширити область застосування методу для вирішення складніших стереологічних задач, зокрема при вивченні мікроструктури матеріалів та біологічних об'єктів.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. Miles, R. E. (1972). The random division of space. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 321(1544), 147–166.
2. Underwood, E. E. (1970). *Quantitative Stereology*. Reading, MA: Addison-Wesley.
3. Jensen, E. B., & Gundersen, H. J. G. (1989). The stereological estimation of moments of particle volume. *Journal of Applied Probability*, 26(3), 744–758.
4. Cruz-Orive, L. M. (1987). Particle size-shape distributions: The general spheroid problem. *Journal of Microscopy*, 145(2), 121–147.
5. Cuzzi, J. N., & Olson, D. M. (2016). Recovering 3D particle size distributions from 2D sections. *Meteoritics & Planetary Science*, 51(12), 2092–2110. DOI is 10.1111/maps.12812.
6. Samonenko I. (2025). Bayesian approach to circle diameter estimation from chord lengths. Can be reached from:
https://github.com/IngaSamoneneko/bayesian_diameter_estimation_1D_to_2D

Література

1. Майлз, Р. Е. (1972). Випадковий поділ простору. *Праці Королівського товариства Лондона. Серія А, Математичні та фізичні науки*, 321(1544), 147–166.
2. Андервуд, Е. Е. (1970). *Кількісна стереологія*. Редінг, Массачусетс: Addison-Wesley.
3. Єнсен, Е. Б., & Гундерсен, Х. Й. Г. (1989). Стереологічна оцінка моментів об'єму частинок. *Журнал прикладної ймовірності*, 26(3), 744–758.
4. Крус-Ориве, Л. М. (1987). Розподіли розмірів і форм частинок: загальна проблема сфероїдів. *Журнал мікроскопії*, 145(2), 121–147.
5. Кузі, Дж. Н., & Олсон, Д. М. (2016). Відновлення 3D-розподілів розмірів частинок за 2D перерізами. *Meteoritics & Planetary Science*, 51(12), 2092–2110. DOI is 10.1111/maps.12812.
6. Самоненко, І. (2025). Бассівський підхід до оцінки діаметра кіл за довжиною хорд. Репозиторій на GitHub. Доступно за посиланням:
https://github.com/IngaSamoneneko/bayesian_diameter_estimation_1D_to_2D

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 12.05.2025	Received 12.05.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 23.05.2025	Received in revised form 23.05.2025
Прийнято 01.06.2025	Accepted 01.06.2025
Опубліковано 25.06.2025	Published 25.06.2025

I.V. Samonenko*,

PhD (Statistics), Associate Professor, ORCID: <http://orcid.org/0009-0001-3366-7894>
Department of Applied Mathematics and Mechanics
Lutsk National Technical University, 75 Lvivska St., Lutsk, Ukraine, 43018

*corresponding author, e-mail: i.samonenko@lntu.edu.ua

Bayesian approach to circle diameter estimation from chord lengths

How to cite:

Samonenko, I. (2025). Bayesian approach to circle diameter estimation from chord lengths. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 23, 264-272. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-23](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-23)

Abstract. This study presents a method for estimating circle diameters based on chord length measurements, which proves particularly valuable for analyzing 2D cross-sections of three-dimensional structures where direct diameter measurement is impossible. The method employs a Bayesian approach that incorporates both the geometric properties of circle chords and prior assumptions about diameter distributions. The author developed a Python algorithm that requires only input data in the form of measured chord lengths and automatically computes the most probable diameter value, its confidence boundaries, and measurement accuracy estimates. Key advantages of the proposed solution include a user-friendly implementation with no need for complex computations, independence from specialized software, open-source availability (via a public repository), and reliable performance even with limited measurement data. Potential applications span multiple disciplines, including materials science (microstructure analysis), nanotechnology (nanoparticle characterization), and stereology (3D parameter reconstruction from 2D sections). The method's principal innovation lies in its optimal combination of theoretical rigor and practical accessibility, making it an effective research tool. By enabling accurate diameter estimation from chord measurements, it overcomes a fundamental challenge in stereometric analysis of circular objects. The algorithm's robustness with small datasets and its open availability position it as a valuable resource for researchers across relevant fields.

In the Introduction section, we review the literature and state the aim and objectives; Materials and Methods describes the uncertainty assessment and numerical implementation; Results and Discussion presents the simulation statistics and a real-data example; the Conclusions highlight the universality and practical value of the proposed algorithm.

Keywords: Bayesian statistics, diameter estimation, chord length, inverse problem, probabilistic method, stereology, nanomaterials.

УДК 625.7/8

А. В. Сєдов*

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7879-6614>

Кафедра будівництва та експлуатації автомобільних доріг ім. О.К. Бірулі
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25,
Харків, Україна, 61002

О. О. Фоменко

асистент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4429-1706>

Кафедра будівництва та експлуатації автомобільних доріг ім. О.К. Бірулі
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25,
Харків, Україна, 61002

*автор-кореспондент, e-mail: avs.1708@ukr.net

Дослідження впливу споживчих властивостей горизонтальної розмітки на безпеку дорожнього руху

Цитувати як:

Сєдов, А. В., Фоменко, О. О. (2025). Дослідження впливу споживчих властивостей горизонтальної розмітки на безпеку дорожнього руху *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 23, 273-284. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-24](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-24)

© 2025, Сєдов, А. В., Фоменко, О. О.

Анотація. У статті наведено інформацію щодо стану безпеки дорожнього руху в Україні. Дорожній рух, в якому безпосередньо беруть участь людина, автомобіль і дорога, відбувається в середовищі, що сформувалося. Безпека дорожнього руху – одна з найзłożоденніших проблем нашого часу. Щоб запобігти значній частині дорожньо-транспортних пригод на дорогах, необхідне влаштування якісної та своєчасної дорожньої розмітки. Дорожня розмітка є ефективним засобом організації руху транспортних засобів, що сприяє підвищенню безпеки дорожнього руху, зниженню кількості дорожньо-транспортних пригод, збільшенню швидкості руху автомобілів та пропускнуої спроможності автомобільної дороги. Дорожня розмітка відіграє ключову роль у формуванні поведінки водіїв на дорогах. Чіткі та видимі лінії допомагають водіям краще орієнтуватися, розуміти межі своїх смуг та дотримуватися правил руху.

У статті сформульовані функціональні цілі дорожньої розмітки та представлена модель впливу дорожньої розмітки на водія транспортного засобу, а також сформульована та представлена схема споживчих властивостей горизонтальної дорожньої розмітки. Споживчі характеристики горизонтальної дорожньої розмітки – сукупність цільових, критеріальних і оціночно-вимірювальних показників, зформованих з урахуванням її функціональних цілей, з урахуванням інтересів її користувачів, на всіх етапах її життєдіяльності. Основні функціональні цілі дорожньої розмітки – забезпечення активної безпеки, інформування учасників руху, естетичність, екологічність, економічність, функціональна довговічність, технологічність будівництва.

Для забезпечення безпечних умов руху необхідно здійснювати систематичний контроль якості дорожньої розмітки та застосовуваних матеріалів з метою своєчасного виявлення невідповідності встановлених параметрів нормативним вимогам.

Ключові слова: безпека, дорога, дорожньо-транспортні пригоди, дорожня розмітка, розмічальні матеріали, споживчі властивості

Вступ

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Порівняно з країнами Європи стан безпеки дорожнього руху в Україні можна охарактеризувати, як вкрай незадовільний через високий рівень смертності та дорожньо-транспортного травматизму. Наслідки дорожньо-транспортних пригод (ДТП) в ЄС завдають збитків у розмірі 2 % ВВП, а в Україні – 3,5 %.

ДТП лише в окремих випадках можуть бути пояснені однією причиною. Зазвичай ДТП є результатом взаємодії низки чинників, серед яких один є вирішальним (рис. 1). Тим часом при аналізі статистичних даних зазвичай вказується лише одна причина, найчастіше – вина водія, який неправильно обрав режим руху [1].

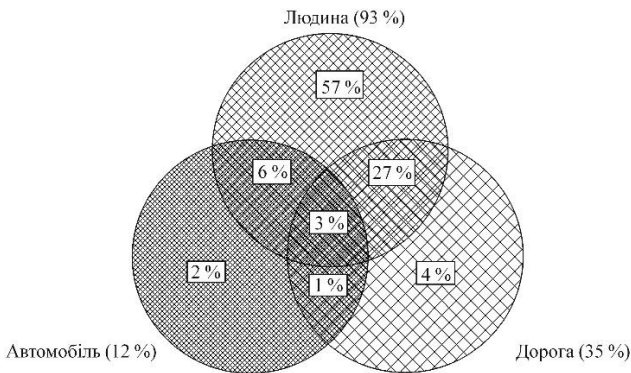


Рис.1. Роль факторів ризику та їх поєднань у виникненні ДТП

При проведенні детального аналізу з врахуванням конкретних особливостей виникнення, з'ясовується, що дорожні умови є прямою чи непрямою причиною 70–85 % ДТП. Дороги стають у таких випадках супутньою причиною ДТП, яка стимулює помилки водіїв.

Зі збільшенням інтенсивності конфліктуючих транспортних та пішохідних потоків підвищується небезпека виникнення ДТП. Велику роль

в забезпеченні безпечних умов руху грають технічні засоби регулювання: дорожні знаки, світлофори, розмітка, які встановлюють черговість, пріоритетність та допустимі напрямки руху транспортних засобів [2, 3].

Однією з причин скоєння більшості ДТП із незадовільними дорожніми умовами є відсутність, або погана помітність горизонтальної дорожньої розмітки.

Мета і завдання дослідження. Забезпечення безпеки дорожнього руху одна із найважливіших проблем сучасності. Причинами дорожньо-транспортних пригод може стати безліч факторів серед яких одним із найбільш вагомих є незадовільний стан дорожньої розмітки. Порухення цілісності, чіткості контуру, потертостей та відсутність можливості розрізнити тип розмітки та її елементів просто неприпустимо при дотриманні правил безпечного руху. Таким чином метою роботи є дослідження моделі споживчих властивостей горизонтальної дорожньої розмітки і її вплив на сприйняття водієм дорожньої обстановки.

Матеріали та методи

Методологічною основою для вирішення поставлених завдань є системний підхід у вивченні впливу дорожньої розмітки на формування поведінки водія і як слідство на безпеку дорожнього руху.

Результати та обговорення

Безпека дорожнього руху, особливо в умовах обмеженої видимості, значною мірою залежить від наявності оптичних орієнтирів на дорозі (рис. 2), серед яких горизонтальна дорожня розмітка займає значне місце [4].

Дорожня розмітка відіграє ключову роль у формуванні поведінки водіїв на дорогах. Чіткі та видимі лінії допомагають водіям краще орієнтуватися, розуміти межі своїх смуг та дотримуватися правил руху [5].

Крім того, дорожня розмітка відіграє важливу роль у попередженні втоми та втрати концентрації у водіїв, особливо на довгих та монотонних маршрутах. Переривчасті лінії, смуги реверсивного руху та зебри створюють візуальні сигнали, які привертають увагу водіїв та допомагають уникнути аварій. У результаті чітка і зрозуміла дорожня розмітка не лише допомагає знизити кількість порушень правил дорожнього руху. Практичний досвід використання горизонтальної дорожньої розмітки показує, що використання розмітки проїзної частини знижує аварійність, в залежності від дорожніх умов, на 5-30 %.



Рис.2. Дорожня розмітка

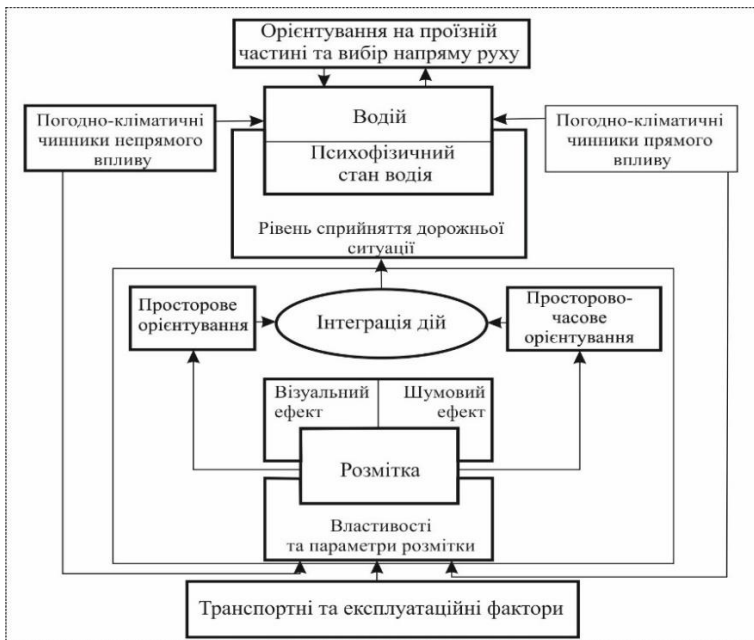


Рис. 3. Модель впливу дорожньої розмітки на водія

Для формування моделі споживчих властивостей горизонтальної дорожньої розмітки необхідно виконати аналіз впливу (прямий і непрямий) природно-кліматичних факторів та особливостей умов експлуатації, які здатні впливати як на функціональні якості дорожньої розмітки, так і на водійські якості учасників руху (рис. 3) [6, 7, 8, 9].

Маючи необхідні для роботи властивості (рис. 4), горизонтальна розмітка по-різному впливає на сприйняття водієм дорожньої обстановки.

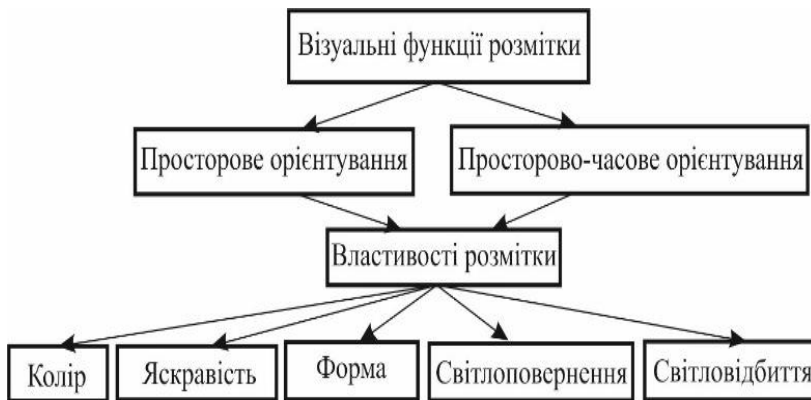


Рис. 4. Схема візуалізаційних властивостей горизонтальної дорожньої розмітки

Таким чином, формується складна структура зв'язків «водій – розмітка – зовнішнє середовище», яка була описана основною теоретичною моделлю на рис. 3. Структурування факторів, що впливають на ефективність горизонтальної дорожньої розмітки, формують уявлення про різні рівні їх впливу: екрануючий ефект між зоровим апаратом водія та дорожньої розмітки, імпульсний ефект миготіння елементів структурної розмітки, а також вплив рельєфної в системі «розмітка – автомобіль – водій», утворення вібрації, шуму (рис. 5) [8, 9].

Значне зростання динамічних параметрів транспортних засобів та інтенсивності руху на автомобільних дорогах зумовлює необхідність забезпечення високих споживчих якостей дорожньої розмітки. Переважаючими матеріалами, що застосовуються для горизонтальної дорожньої розмітки є фарби, емалі і термопластики (рис. 6) [10, 11, 12].

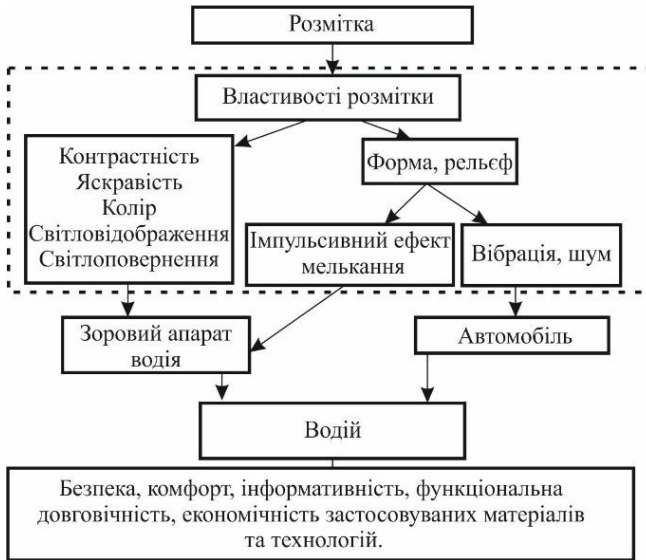


Рис. 5. Схема споживчих властивостей горизонтальної дорожньої розмітки

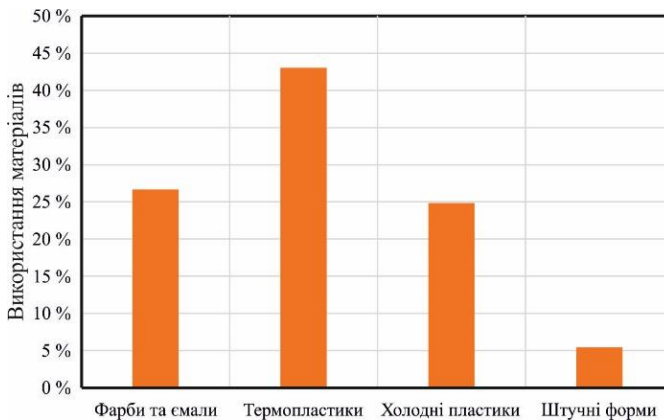


Рис. 6. Переважаючі матеріали для дорожньої розмітки

Якість дорожньої розмітки залежить насамперед від дотримання технології її нанесення, застосовуваних матеріалів, погодню-кліматичних факторів, стану покриття в момент нанесення дорожньої розмітки та в

період її експлуатації, а також від умов експлуатації самої автомобільної дороги (рис. 7).

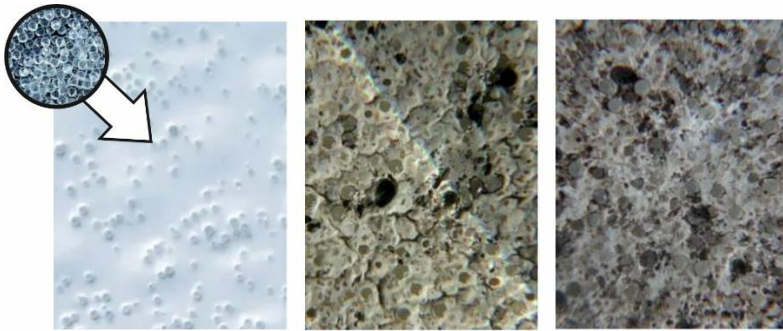


Рис. 7. Зміна показників видимості розмітки при експлуатації дороги

До основних параметрів, що визначають ефективність дорожньої розмітки, належать: забезпечення її видимості у будь-який час доби в різних умовах експлуатації, фактичний термін служби, функціональна довговічність (термін служби), вартість матеріалів, що застосовуються. Наприклад, при оцінці ефективності застосування різних розмічувальних матеріалів часто не береться до уваги їх різні терміни служби на шорстких і гладких покриттях.

На шорстких покриттях термін служби горизонтальної розмітки, обумовлений не тільки стиранням цього матеріалу, але і зносостійкістю кам'яного матеріалу, що формує шорсткість покриття, показниками реологічних і механічних властивостей матеріалу покриття.

Це пов'язано з тим, що при експлуатації дороги властивості матеріалів змінюються внаслідок втоми, старіння та зміни кліматичних умов. Переважна більшість автомобільних доріг мають шорстку поверхню, на таких покриттях зношування тонких розмічальних матеріалів по площі розмітки нерівномірне, і питання про термін служби дорожньої розмітки необхідно розглядати, вивчаючи спільну роботу розмічального матеріалу та дорожнього покриття.

Аналіз досліджень показав, що стирання шару розмітки з вершин зерен не викликає зміни видимої площі розмітки. Тривалість цієї стадії залежить від витрати і властивостей матеріалу, що формує товщину розмітки на вершинах шорсткості покриття, і надає порівняно невеликий вплив на загальний термін служби розмітки. Аналіз результатів показав, що чім менше розмір зерен кам'яного матеріалу, тим менше інтенсивність зносу

(рис. 8). Таким чином, в процесі стирання шорсткості покриття відбувається зменшення видимої площі розмітки за рахунок оголення вершин зерен з подальшим зростанням майданчиків зносу.

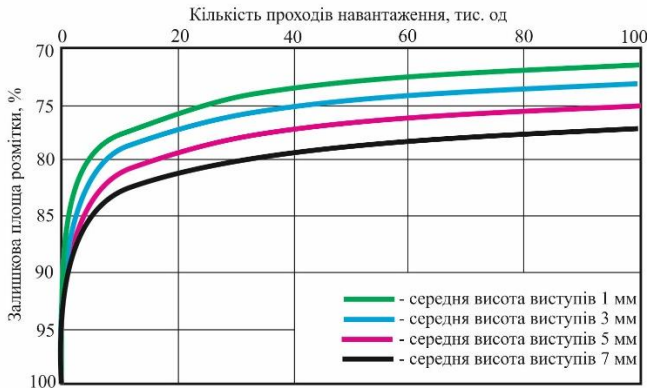


Рис. 8. Залежність залишкової площі розмітки від кількості проходів навантаження за різної шорсткості покриття

Інтенсивність даної стадії залежить від властивостей кам'яного матеріалу, що формує шорсткість покриття.

Висновки

Дорожня розмітка є одним із основних елементів, що забезпечують безпеку на дорогах. Поліпшення та підтримка якості дорожньої розмітки мають прямий вплив на зниження аварійності на дорогах. Різні дослідження та аналіз статистичних даних показують, що оновлення розмітки, включаючи її видимість та відповідність стандартам, сприяє значному зменшенню числа ДТП.

Функціональна довговічність розмітки залежить від якості розмітального матеріалу, типу дорожнього покриття та рівня експлуатаційного навантаження. На шорстких покриттях термін служби горизонтальної розмітки, виконаної тонкими шарами (<1 мм) матеріалу, обумовлений не тільки стиранням цього матеріалу, але і зносостійкістю кам'яного матеріалу, що формує шорсткість покриття, показниками реологічних і механічних властивостей матеріалу покриття.

Для забезпечення безпечних умов руху необхідно здійснювати систематичний контроль якості дорожньої розмітки та застосовуваних матеріалів з метою своєчасного виявлення невідповідності встановлених параметрів нормативним вимогам.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. In Ukraine, the number of road accidents and the mortality rate have increased significantly over the year. URL: <https://life.pravda.com.ua/society/2024/01/27/259076/> (access date: 20.4.2025).
2. The most common causes of road accidents. URL: <https://narscars.com.ua/ua/blog/nuzhnoznat/samye-rasprostranennye-prichiny-dtp> (access date: 21.4.2025).
3. Bondar T.V. Belenchuk O.V. Assessment of the role of road conditions in the occurrence of road traffic accidents in areas of their concentration. URL: http://dorogimosti.org.ua/files/upload/r4_5.pdf (access date: 20.4.2025).
4. Voznyuk A.B., Nagrebelna L. P., Minenko E. B. Deficiencies in road conditions and their impact on the occurrence of road accidents. URL: https://nidi.org.ua/files/upload/%D0%97%D0%B1_%D0%94%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B3%D0%B8%20%D1%96%20%D0%BC%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B8%20_2019%20%E2%84%96%2019%20%D1%81%20163-172.pdf (access date: 25.4.2025).
5. DSTU 2587:2010. Road safety. Road markings. General technical requirements. Control methods. Application rules. [Actual from 2011-04-01]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2011. 56 p.
6. On approval of the Strategy for increasing the level of road safety in Ukraine for the period until 2024: Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 10/21/2020 No. 1360-p. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1360-2020-%D1%80#Text/> (date of access: 4/25/2025).
7. Goncharenko F. P. (1999). Theoretical foundations and practical methods for increasing road safety during the operation of automobile roads: monograph. K., 352 p.

8. Burghardt T., Pashkevich A. (2020). Materials selection for structured horizontal road markings: financial and environmental case studies. European Transport Research Review. Germany, 12, 11. <https://doi.org/10.1186/s12544-020-0397-x>.
9. Burghardt T., (2018). High durability - high retroreflectivity solution for a structured road marking system. Conference: International Conference on Traffic and Transport Engineering (ICTTE 2018). Belgrade, 1096-1102.
10. Gostev Y.G., Rumyantsev L.Yu., Fosch I.V., Kostrulyova T.E. (2011). Functional durability of road markings and quality of marking material. Road Industry of Ukraine. Kyiv, 3, 72-74.
11. Gostev Y.G., Rumyantsev L.Yu., Fosch I.V., Kostrulyova T.E. (2012). Modern requirements for the use of plastics, polymer tapes, and glass microbeads for horizontal marking of highways. Avtoshlyakhovyk Ukrainy. Kyiv, 5, 42-48.
12. Gostev Y.G., Kostrulyova T.E., Foshch I.V. (2017). Analysis of world experience in the use of fluorescent paint or fluorescent compositions. Dorogy i mosty. Kyiv, 17, 5460. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2017.17.054>.

Література

1. В Україні за рік суттєво збільшилося ДТП і зріс рівень смертності. URL: <https://life.pravda.com.ua/society/2024/01/27/259076/> (дата звернення: 20.4.2025).
2. Найпоширеніші причини ДТП. URL: <https://narscars.com.ua/ua/blog/nuzhnoznat/samye-rasprostranennyye-prichiny-dtp> (дата звернення: 21.4.2025).
3. Бондар Т.В. Беленчук О.В. Оцінка ролі дорожніх умов у виникненні дорожньо-транспортних подій на ділянках їх концентрації. URL: http://dorogimosti.org.ua/files/upload/r4_5.pdf (дата звернення: 20.4.2025).
4. Вознюк А.Б., Нагребельна Л. П., Міненко Є. В. Недоліки в дорожніх умовах та їх вплив на виникнення дорожньо-транспортних пригод. URL: https://nidi.org.ua/files/upload/%D0%97%D0%B1_%D0%94%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B3%D0%B8%20%D1%96%20%D0%BC%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B8%20_2019%20%E2%84%96%2019%20%D1%81%20163-172.pdf (дата звернення: 25.4.2025).
5. ДСТУ 2587:2010. Безпека дорожнього руху. Розмітка дорожня. Загальні технічні вимоги. Методи контролювання. Правила застосування. [Чинний від 2011-04-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2011. 56 с.
6. Про схвалення Стратегії підвищення рівня безпеки дорожнього руху в Україні на період до 2024 року: розпорядження Кабінету Міністрів України від 21.10.2020 р. №1360-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1360-2020-%D1%80#Text/> (дата звернення: 25.4.2025).
7. Гончаренко Ф. П. (1999). Теоретичні основи та практичні методи підвищення безпеки руху при експлуатації автомобільних доріг : монографія. К., 352 с.

8. Burghardt T., Pashkevich A. (2020). Materials selection for structured horizontal road markings: financial and environmental case studies. European Transport Research Review. Germany, 12, 11. <https://doi.org/10.1186/s12544-020-0397-x>.

9. Burghardt T., (2018). High durability - high retroreflectivity solution for a structured road marking system. Conference: International Conference on Traffic and Transport Engineering (ICTTE 2018). Belgrade, 1096-1102.

10. Гостев Ю.Г., Румянцев Л.Ю., Фоц І.В., Кострульова Т.Є. (2011). Функціональна довговічність дорожньої розмітки та якість розмічального матеріалу. Дорожня галузь України. Київ, 3, 72-74.

11. Гостев Ю.Г., Румянцев Л.Ю., Фоц І.В., Кострульова Т.Є. (2012). Сучасні вимоги щодо застосування пластиків, полімерних стрічок, мікрокульок скляних світлоповертальних для горизонтальної розмітки автомобільних доріг. Автошляховик України. Київ, 5, 42-48.

12. Гостев Ю.Г., Кострульова Т.Є., Фоц І.В. (2017). Аналіз світового досвіду використання люмінесцентної фарби або люмінесцентних композицій. Дороги і мости. Київ, 17, 5460. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2017.17.054>

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 19.05.2025	Received 19.05.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 20.05.2025	Received in revised form 20.05.2025
Прийнято 01.06.2025	Accepted 01.06.2025
Опубліковано 25.06.2025	Published 25.06.2025

A. V. Siedov*

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7879-6614>
Department Construction and operation of highways named after O.K. Birulya
Kharkiv National Automobile and Highway University, Yaroslav Mudrogo str., 25, Kharkiv, Ukraine, 61002

O. O. Fomenko

assistant, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4429-1706>
Department Construction and operation of highways named after O.K. Birulya
Kharkiv National Automobile and Highway University, Yaroslav Mudrogo str., 25, Kharkiv, Ukraine, 61002

*corresponding author, e-mail: avs.1708@ukr.net

Research on the impact of consumer properties of horizontal markings on road safety

How to Cite:

Siedov, A. V., Fomenko, O. O., (2025). Research on the impact of consumer properties of horizontal markings on road safety *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 23, 273-284. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-24](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-24)

Abstract. The article provides information on the state of road safety in Ukraine. Road traffic, in which a person, a car and a road directly participate, takes place in a

formed environment. Road safety is one of the most pressing problems of our time. To prevent a significant part of road accidents, it is necessary to install high-quality and timely road markings. Road markings are an effective means of organizing vehicle traffic, which contributes to improving road safety, reducing the number of road accidents, increasing the speed of cars and the carrying capacity of the road. Road markings play a key role in shaping the behavior of drivers on the roads. Clear and visible lines help drivers to better navigate, understand the boundaries of their lanes and follow the rules of the road. The article formulates the functional goals of road markings and presents a model of the impact of road markings on the driver of a vehicle, as well as formulates and presents a diagram of the consumer properties of horizontal road markings. Consumer characteristics of horizontal road markings are a set of target, criterion and evaluation and measurement indicators formed taking into account its functional goals, taking into account the interests of its users, at all stages of its life. The main functional goals of road markings are ensuring active safety, informing road users, aesthetics, environmental friendliness, economy, functional durability, manufacturability of construction and demarcation.

To ensure safe traffic conditions, it is necessary to carry out systematic quality control of road markings and materials used in order to timely detect non-compliance of the established parameters with regulatory requirements.

Keywords: safety, road, traffic accidents, road markings, marking materials, consumer properties

С. В. Синій*

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3913-6725>

Кафедра будівництва та цивільної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

Н. В. Гупік

студентка-бакалавр, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0691-077X>

Кафедра будівництва та цивільної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

Л. М. Ксьоншкевич

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9619-4855>

Кафедра міського будівництва та господарства

Одеська державна академія будівництва та архітектури, вул. Дідріхсона, 4, Одеса, Україна, 65029

О. М. Крантовська

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6182-7691>

Кафедра опору матеріалів

Одеська державна академія будівництва та архітектури, вул. Дідріхсона, 4, Одеса, Україна, 65029

О. А. Ужегова

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2352-2907>

Кафедра будівництва та цивільної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

С. В. Ротко

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1860-7890>

Кафедра будівництва та цивільної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

*автор-кореспондент, e-mail: sergii.synii@gmail.com

Особливості методики інтеграції інженерних мереж з тепловим насосом у будівлю в долині річки Сапалаївки у Луцьку

Цитувати як:

Синій, С. В., Гупік, Н. В., Ксьоншкевич, Л. М., Крантовська, О. М., Ужегова О. А., Ротко, С. В. (2025). Особливості методики інтеграції інженерних мереж з тепловим насосом у будівлю в долині річки Сапалаївки у Луцьку. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 23, 285-300. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-25](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-25)

© 2025, Синій, С. В., Гупік, Н. В., Ксьоншкевич, Л. М., Крантовська, О. М., Ужегова О. А., Ротко, С. В.

Анотація. Аналіз літературних джерел показав стійкі тенденції: технічного і технологічного розвитку інженерних мереж в напрямку використання розумних і інтелектуальних технологій; ріст вимог до енергоефективності і екологічності інженерних мереж та об'єктів будівництва, в які ці мережі інтегруються. Проаналізовано приклади гідроморфологічної трансформації міських річок. Зроблено висновок про важливість збереження екосистеми Сапалаївки для Луцька.

Проаналізовано особливості існуючого урбаністичного ландшафту Луцька навколо річки Сапалайвіки. Детальніше проаналізовано стан ділянки рекреаційної зони Сіті-парку у долині цієї річки. Відзначено нові зміни урбаністичного ландшафту південного схилу: його укріплено залізобетонною стіною з контрфорсами. Біля схилу заплановано будівництво громадської будівлі з інтеграцією інженерних мереж з тепловим насосом.

Розроблено удосконалену методiku досліджень, яка передбачає різнобічний аналіз характеристик об'єкта досліджень. Аналізуються містобудівний, екологічний, соціально-економічний, архітектурно-будівельний аспекти. Такий науковий підхід дозволяє досягти в процесі проєктування найбільш збалансованих технічних рішень. Їх впровадження сприятиме досягненню кращих результатів з інтеграції інженерних мереж у об'єкти будівництва. Результати проєктування отримані в програмному середовищі Uropor. Для проведення аналізу в межах розробленої методики пропонується залучати відомі методологічні підходи. Залежно від потреб аналізу вони можуть бути різної математичної складності: від принципів SWOT-аналізу до методів аналізу та/або оптимізації з отриманням цільових функцій. Оптимізацію рекомендується проводити в один етап (визначати цільову функцію залежно від факторів, що є показниками аспектів) або у два етапи (коли показники аспектів також визначаються як цільова функція від факторів у складі кожного аспекту). Розроблену методiku рекомендується використовувати як методичний підхід до вирішення складних проєктних рішень з інтеграції інженерних мереж в об'єкти будівництва. Вона покращує узгодженість таких рішень з містобудівними і екологічними вимогами до урбаністичного ландшафту.

Ключові слова: інженерні мережі, методика, аналіз, будівля, тепловий насос, долина річки, містобудування, екологія, архітектурно-будівельний аспект.

Вступ

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Проведений аналіз сучасних процесів промислового розвитку на етапах Індустрії 4.0 – Індустрії 5.0 дозволив виявити тенденції технічного та технологічного розвитку інженерних мереж, враховуючи у будівлях та спорудах, до зростання орієнтованості цих мереж на використання розумних та інтелектуальних технологій з підвищенням рівня вимог до енергоефективності та екологічності як власне мереж, так і об'єктів будівництва, в які вони інтегруються [1-10 та ін.]. У житлових та громадських будівлях це особливо важливо для систем опалення, охолодження і гарячого водопостачання, що є найбільш енергомісткими [8-12 та ін.].

Будівництво нових громадських будівель у центральних районах міст, таких як давнє українське місто Луцьк, зазвичай ускладнене через існуючу щільність забудови та складність рельєфу вільних від забудови ділянок. У сучасному Луцьку це передусім зумовлено наявністю історично сформованого урбаністичного ландшафту [13, 14 та ін.], що викликає потребу ретельно продуманих його змін у відповідності до прогресивних вимог сталого розвитку міст, які включають розширений, у порівнянні з

нормативними вимогами до проектування та будівництва, спектр питань з містобудування та архітектури, екології, енергоефективності та ресурсозбереження і відповідно розширений методологічний підхід.

Історія розвитку території Луцька щільно пов'язана з процесами антропогенного освоєння та урбанізації берегів та ділянок навколо річки Стир, її приток та рукавів, що підтверджується у [13-15 та ін.].

Однією з таких приток є невелика річка Сапалаївка, основна частина якої протікає в межах території Луцька, враховуючи її впадання у Стир. Ґрунтовні результати досліджень водних об'єктів Луцька, зокрема і детальну характеристику річки Сапалаївки виконали Забокрицька М. Р., Хільчевський В. К. у праці [15]. Цінну відеофіксацію сучасного стану русла і берегів річки (рис. 1) подано у журналістських дослідженнях [16].



Рис. 1. Скріншот із виглядом на південний схил (по центру) урборельєфу ділянки рекреаційної зони у долині річки Сапалаївки, станом на червень 2017 р. [16]

Сучасний стан ділянки рекреаційної зони у долині річки з укріпленням схилом, під яким планується будівництво громадської будівлі з інтеграцією інженерних мереж з тепловим насосом наведено на рис. 2.

Вважаємо, що виходячи з сучасних принципів сталого розвитку міст, збереження екосистеми Сапалаївки є важливим для Луцька, незважаючи на певні перешкоди щодо розвитку міської інженерної та транспортної інфраструктури. У минулому столітті ці пріоритети щодо розвитку інфраструктури домінували: для забезпечення кращого розвитку такої інфраструктури часто використовувались способи ховання невеликих річок у землю. Ці та інші гідроморфологічні трансформації призводили до суттєвого погіршення якості річкової води [15] з усіма наступними наслідками зі зменшення біорізноманіття на прилеглої міській території.



Рис. 2. Вигляд на південний схил, укріплений залізобетонною стіною з контрфорсами, урборельєфу ділянки рекреаційної зони у долині річки Сапалаївки, станом на вересень 2024 року (авторське фото)

В Україні негативний досвід ховання річки у межах міста у підземний колектор, який фактично стає елементом міської каналізації, бачимо на широковідомих та обговорюваних в українському суспільстві прикладах річок Полтви у Львові та Либідь у Києві, адже здійснювана в наш час їх ревіталізація з відкриттям принаймні окремих ділянок русел потребує багато зусиль громадськості та міської влади [17-19 та ін.].

Загалом така тенденція ховання річок чи їх ділянок в колектори в межах міста спостерігалась у світі в часи бурхливої індустріалізації міст. Одним з яскравих прикладів є струмок Чонгечхон в Сеулі (Південна Корея). Його приховання відбувалось під впливом переконань швидкої індустріалізації та урбанізації у 1950-х – 1970-х роках шляхом улаштування міської транспортної магістралі над схованим у землю під залізобетонними конструкціями руслом струмка, дороговартісне розкриття якого враховуючи повний демонтаж конструкцій транспортної магістралі відбувалося у 2003 – 2005 роках [20, 21 та ін.].

Отже, аналіз досліджень [17-22] підтверджує що зміни урболандшафту шляхом ревіталізації, ренатуралізації річок, які внаслідок антропогенного впливу в минулому зазнали гідроморфологічних трансформацій, забезпечують позитивний ефект відновлення місцевої екосистеми за рахунок покращення показників навколишнього міського клімату (чистіше повітря, покращення температуро-вологого режиму тощо), якості річкової води та значне підвищення біорізноманіття.

При цьому доведено, що рекреаційні можливості урболандшафтів відновлених екосистем таких річок значно покращуються [22]. Тому цей

факт потрібно обов'язково враховувати при прийнятті містобудівних рішень, тим більше для річок, що уникли таких кардинальних антропогенних впливів.

Наведені факти спонукають до прийняття екологічно орієнтованих містобудівних рішень та рішень інженерних мереж будівель і споруд в долині річки Сапалаївки у Луцьку, що підкреслює важливість застосування правильно збалансованої методики інтеграції інженерних мереж у будівлі та споруди на її берегах.

Мета і завдання дослідження. Метою досліджень є удосконалення методики інтеграції інженерних мереж з тепловим насосом у будівлю з урахуванням особливостей її розташування в долині річки Сапалаївки у Луцьку і для цього завданнями дослідження передбачено обґрунтування вибору аспектів аналізу характеристик об'єкта досліджень та отримання підготовлених до впровадження результатів у вигляді розроблених проектних рішень в програмному середовищі Uronor [23].

Матеріали та методи

Методикою досліджень передбачено аналіз літературних джерел, проектної та технічної документації, проведення комплексного аналізу та синтезу ролі містобудівного, екологічного, соціально-економічного, архітектурно-будівельного аспектів у прийнятті науково обґрунтованих проектних рішень для умов інтеграції інженерних мереж з тепловим насосом у будівлю, що проєктується для умов складного урбанізованого ландшафту долини міської річки.

Результати та обговорення

Згідно даних геопорталу [24] розглядувана ділянка в долині річки Сапалаївки у Луцьку належить до рекреаційної зони Сіті-парку (рис. 1-3). Тому інтеграція у будівлю на цій ділянці інженерних мереж з альтернативним джерелом енергії потребує методологічно збалансованого підходу. Тому, виходячи з аналізу літературних джерел пропонується удосконалена методика досліджень, якою передбачено обов'язковість проведення різнобічного аналізу (в містобудівному, екологічному, соціально-економічному, архітектурно-будівельному аспектах) характеристик об'єкта досліджень, як запоруки досягнення в процесі робіт з проєктування найбільш узгоджених між собою та сприятливих для впровадження технічних рішень. Розглянемо аспекти детальніше (рис. 4).

Насамперед слід відзначити наступну ієрархію їх взаємних зв'язків та впливів: 1) усі вони пов'язані один з одним; 2) аналіз архітектурно-будівельного аспекту включає результати аналізу усіх інших аспектів, а його результати є основою вихідних даних до прийняття принципових рішень з проєктування інженерних мереж.

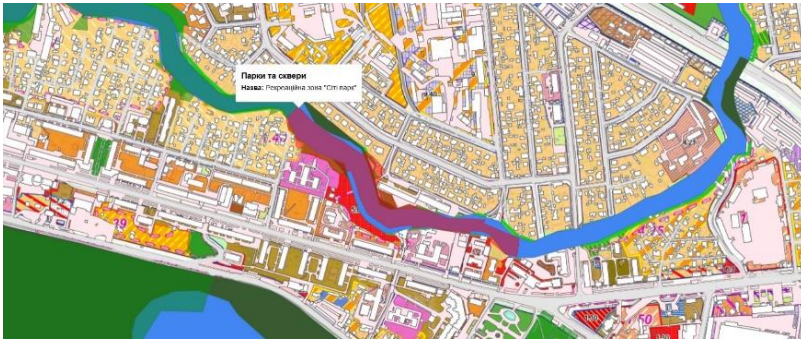


Рис. 3. Розташування рекреаційної зони "Сіті-парк" (темно-червоний колір) та розглядуваної громадської будівлі (у західній частині світло-червоної зони) за новим Генпланом Луцька [24]

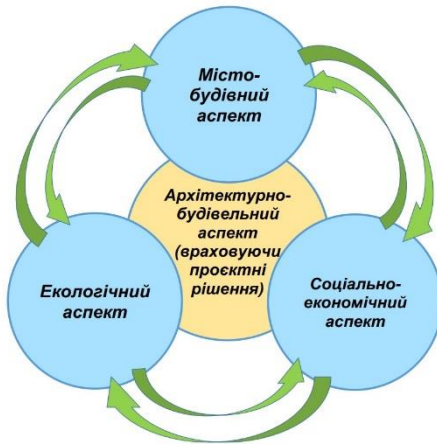


Рис. 4. Структура взаємодії містобудівного, екологічного, соціально-економічного, архітектурно-будівельного аспектів аналізу характеристик об'єкта досліджень

Містобудівний аспект. Міські інженерні мережі на території Центрального житлового району Луцька, до якої належить розглядувана ділянка в долині річки Сапалаївки, є розгалуженими і забезпечують потреби централізованого гарячого та холодного водопостачання, господарсько-побутової та ливневої каналізації, тепло-, газо-, електропостачання житлової та громадської забудови.

Інтенсивний розвиток забудови Центрального району відбувався на протязі усього минулого століття (зокрема, теперішній проспект Волі став одним з перших, до забудови якого було прокладено міський водопровід [25]). Зважаючи на це, щільна міська забудова на сьогодні є характерною для цього району. При цьому стан більшості зовнішніх мереж

підтримується задовільним, що переважно не забезпечує сучасні вимоги до енергоефективності (за винятком окремих ділянок мереж вздовж проспекту Волі, що реконструювався у 2020-2024 роках).

Крім того, не зважаючи на успішно виконувану у Луцьку поетапну модернізацію господарства міських тепломереж з залученням коштів ЄБРР [26], використання відновлюваних джерел енергії для таких потреб є все ще незначним, а транспортування тепломережами дорогим, що незважаючи на технічну можливість приєднання до існуючих мереж централізованого теплопостачання від районної котельні на традиційному паливі спонукає до пошуку альтернативних способів теплозабезпечення для будівлі розглядуваної ділянки в долині річки Сапалаївки.

Рішення з вибору відновлюваних джерел енергії проаналізовано у [10]. Виходячи з особливостей розташування розглядуваної будівлі у складі комплексу забудови в низині території, якою є долина річки, і при цьому поряд з крутим та високим відносно висоти будівлі схилом, укріпленням попередньо зведеною підпірною залізобетонною стінкою, було обрано використання теплового насоса. Наступний крок з уточнення виду насоса приймався при аналізі умов архітектурно-будівельного аспекту.

Екологічний аспект. Спостерігається стійка тенденція до зростання ролі цього аспекту у містобудуванні та будівництві загалом [6-10, 15, 17-22, 24-29 та ін.]. Він охоплює усі можливі умови функціонування, починаючи з ролі інженерних мереж у складі об'єкту будівництва і закінчуючи впливом інженерних мереж та самого об'єкту будівництва на міську екосистему. Тобто у розглядуваному випадку він не обмежується, а включає у себе нормативні вимоги розділу ОВНС [30].

На сьогодні річка Сапалаївка, в долині якої передбачено будівництво розглядуваної будівлі, разом із зеленою зоною її узбережжя все ще залишаються у Луцьку на значній частині її русла доступними для використання з рекреаційною метою. Цьому сприяють існуючі ділянки зелених зон самосівних зарослей (трави, кущів і переважно листяних дерев) та міських парків вздовж її русла, враховуючи територію до та після розглядуваної ділянки [15-17, 24]. При цьому також окремі існуючі ділянки берегів Сапалаївки розташовані практично впритул до ділянок міської забудови, переважно садибної, що є перешкодою до влаштування пішохідних та велосипедних доріжок і зон вздовж русла. Окремі ділянки берегів річки в межах міста випрямлені та укріплені бетонними плитами. Також, враховуючи щільність існуючих інженерних та транспортних мереж, особливо в Центральному районі, цю неглибоку річку перетинає багато трубопроводів інженерних мереж, автомобільних мостів та пішохідних містків.

Крім того, наявність прихованих скидів у річку господарсько-побутової каналізації з прилеглої садибної забудови, існуючих ділянок дощової каналізації та стікання поверхневих вод з міських урбанізованих

територій, стихійні смітники на узбережжі значно забруднюють воду Сапалаївки та створюють неприємний запах. Позитивним є організування Луцькою міською радою заходи з санітарного очищення русла та прилеглої території, інформаційна робота [24], поступове зростання рівня екологічної відповідальності лучан. Завдяки цьому санітарний стан річки Сапалаївки в межах Луцька поступово покращується.

У другій половині минулого століття в середовищі луцьких фахівців з містобудування певний час обговорювалась ідея прокладання над Сапалаївкою транспортної артерії міста. На щастя, ця ідея жорсткого антропогенного впливу на екосистему річки не була втілена і доля Сапалаївки не повторила проаналізований вище негативний досвід [15-22], який в наш час потребує впровадження складних та дороговартісних заходів з ревіталізації, ренатуралізації річок.

Оцінка впливу від влаштування та функціонування не лише об'єктів будівництва, а і їх споруд інженерних мереж на міську екосистему, враховуючи можливі зміни урболандшафту, є комплексним показником, який суттєво залежить від вибору джерела енергії (у розглядуваному випадку – від типу теплового насоса, тобто системи забору енергії з навколишнього середовища).

Соціально-економічний аспект. На сьогодні аналіз характеристик таких як розглядуваний об'єкт досліджень опосередковано чи напряму включає також і соціально-економічні впливи, які відіграють свою роль у формуванні остаточних проектних рішень. Більшість з цих впливів законодавчо унормована, наприклад до них належать нормативні ТЕО та кошторис робіт, результати громадського обговорення та інші процедури, пов'язані із затвердженням та впровадженням проекту. Слід відзначити що сучасний розвиток громадянського суспільства та процеси глобалізації сприяють зростанню ролі соціально-економічних впливів на прийняття остаточних рішень міською владою. Потреби створення міських просторів, формування міської забудови та критичної інфраструктури щільно переплітаються зі зростанням громадянської активності мешканців міста в напрямку відстоювання важливих для них цінностей, зокрема екологічного, культурного, історичного характеру, що врешті відображається на проектних рішеннях впроваджуваних об'єктів будівництва. Тобто поряд із оцінкою результатів суто економічних розрахунків від впровадження проекту у суспільстві спостерігається тенденція до посилення впливу соціальних очікувань від реалізації проекту. Зокрема, впровадження розглядуваної будівлі в долині річки Сапалаївки сприяє подальшому формуванню та розвитку міського громадського простору на основі переосмислення ролі цього урбанізованого ландшафту у сталому розвитку міста.

Архітектурно-будівельний аспект. Сюди входять питання, що безпосередньо стосуються прийняття проектних рішень, сформованих під

впливом результатів досліджень містобудівного та екологічного аспекту: архітектурно-планувальних та проектного розрахунку інженерних мереж з тепловим насосом. Тому даний аспект є за своєю суттю прикладним і стосується прийняття конкретних технічних рішень із урахуванням сучасного стану технічного та технологічного розвитку інженерних мереж і з використанням інструментарію інформаційно-розрахункових та інформаційно-комунікаційних технологій. Виходячи з цього, на основі аналізу техніко-технологічних характеристик різних типів теплових насосів та можливостей їх використання в геодезичних та геологічних, погодно-кліматичних умовах ділянки для триповерхової громадської будівлі з підвалом в долині річки Сапалаївки, територія якої перебуває у щільному взаємовпливі з оточуючою її урбанізованою міською територією Центрального житлового району Луцька, прийнято рішення про застосування геотермальних теплових насосів [10].

Проведення різнобічного аналізу в межах пропонованої методики може в свою чергу передбачати використання відомих методологічних підходів при детальному розгляді кожного з зазначених аспектів. Наприклад, збір даних із застосуванням методів аналізу літературних та інших джерел інформації, методів опитування респондентів, робота з вихідними даними із застосуванням SWOT-аналізу або більш складних методів аналізу та/або оптимізації з отриманням очікуваних цільових функцій. При більш детальному дослідженні цільову функцію можна визначати у два етапи: спочатку визначати параметри оптимізації (y_i) для кожного із запропонованих вище аспектів, які є функціями від кількості (n) факторів (x_n) в межах конкретного аспекту, а потім за цими параметрами оптимізації визначити узагальнену цільову функцію (u) за усіма аспектами:

$$y_i = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (1)$$

$$u = f(y_1, y_2, \dots, y_i), \quad (2)$$

тобто функцію, що безпосередньо впливає на збалансоване за впливом усіх аспектів кінцеве проектне рішення інтеграції інженерних мереж з тепловим насосом у будівлю в долині річки Сапалаївки у Луцьку.

Розробленою методикою передбачається що проектні рішення систем водопостачання і каналізації, опалення, охолодження, вентиляції слід виконувати в програмних комплексах з властивостями проектного конструювання та розрахунку. Як один із можливих програмних комплексів для цих потреб було вибрано Uronor [23], фрагменти з результатами проектування у ньому наведено на рис. 5. Практичний досвід

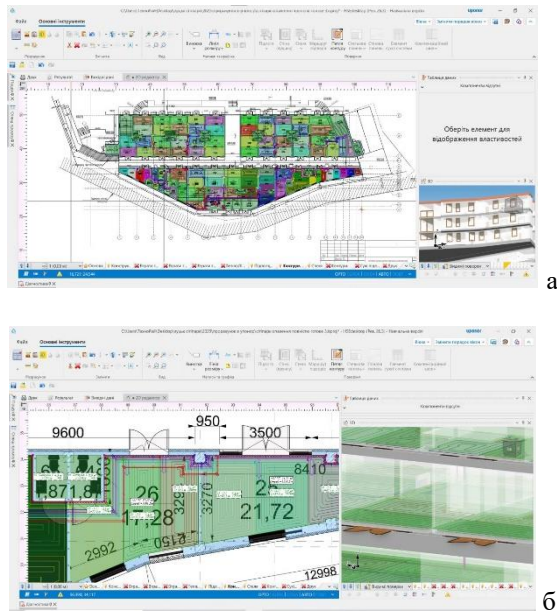


Рис. 5. Приклади а), б) рішень системи підлогового опалення будівлі в середовищі Uronor [23], прийнятих на основі розробленої методики

показав, що цей інструмент забезпечує швидкість, точність процесу проєктування та об'єктивність отриманих при цьому проєктних рішень.

Більш розгорнуто усі прийняті проєктні рішення, отримані за результатами даної методики та виконаними у програмному середовищі [24, 31] планується відобразити у бакалаврській роботі здобувачки Гупік Н. В. на тему: "Торгово-оздоровчий комплекс з геотермальними тепловими насосами у Луцьку" у червні 2025 року. Підготовлена до впровадження проєктна документація передана ТОВ "Вестсантехінстал", з яким співпрацює ЛНТУ.

Висновки

Розроблена методика дозволяє удосконалити процеси пошуку, дослідження та прийняття оптимальних чи раціональних результатів інтеграції інженерних мереж з тепловим насосом у будівлю в долині річки Сапалаївки у Луцьку завдяки детальнішому та ретельнішому розширеному розгляді та коректному аналізу усіх основних аспектів (містобудівного, екологічного, соціально-економічного, архітектурно-будівельного), що передбачають можливість досягнення в процесі проєктування найбільш узгоджених між собою та сприятливих для впровадження технічних рішень.

Даний досвід можна використовувати як методичний підхід до вирішення складних проєктних рішень у практиці інтеграції інженерних мереж в об'єкти будівництва, що потребують високої узгодженості з містобудівними та екологічними вимогами до урболандшафту.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки. Автори висловлюють подяку ТОВ "Вестсантехінстал" і особисто його директору Волинцю А. О. за надану технічну інформацію за темою дослідження.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. Hermann, M., Pentek, T., Otto, B. (2016). Design principles for industrie 4.0 scenarios. *49th Hawaii international conference on system sciences (HICSS)*, 3928-3937. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2016.488>
2. Broo, D. G., Kaynak, O., Sait, S. M. (2021). Rethinking engineering education at the age of industry 5.0. *J. Ind. Inf. Integr.*, 25, 100311. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100311>
3. Tran, T.-A. Ruppert, T., Eigner, G., Abonyi, J. (2022). Retrofitting-Based Development of Brownfield Industry 4.0 and Industry 5.0 Solutions," in *IEEE Access*, 10, 64348-64374. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3182491>
4. Chiorean, L.-D., Vaida, M.-F. (2024). Wastewater Pumping Stations Retrofitting. Development of a Brownfield Industry 4.0 Solution. *25th ICCO, Krynica Zdrój, Poland*, 1-6, <https://doi.org/10.1109/ICCC62069.2024.10569376>
5. Coelho, P., Bessa, C., Landeck, J., Silva, C. (2023). Industry 5.0: The Arising of a Concept. *Procedia Computer Science*, 217, 1137-1144. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.312>
6. Hamilton, S., Charalambous, B., Wyeth, G. (2021). Improving Water Supply Networks: Fit for Purpose Strategies and Technologies. IWA Publishing, 103. <https://doi.org/10.2166/9781780409207>
7. Guo, H., Lin, J.-R., Yu, Y. (2023). Intelligent and Computer Technologies Application in Construction. *MDPI*, 306. <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-8151-4>
8. Mosiichuk, I. V., Uzhehova, O. A., Rotko, S. V., Synii S. V., Pakholiuk O. A. (2022). Application of heat pumps in the heating and hot water supply systems on the

example of the city of Lutsk. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 18, 71-80. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-8\(18\)-09](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-8(18)-09)

9. Dzhedzhula V. V. (2024). Integration of alternative energy sources into public buildings' heating systems. *Modern technologies, materials, and designs in construction*, 1, 134-138. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2024-1-134-138>

10. Synii, S. V., Hupik, N. V., Orešković, M. (2025). Justification of the choice of alternative energy sources for a building in the Sapalaivka River valley in Lutsk. *Innovations in Construction: Collection of Abstracts X International Scientific-Practical Internet Conference of Higher Education Applicants and Young Scientists*, 15 of May 2025, Lutsk, LNTU, 155-157. <https://sites.google.com/view/iic-2025>

11. Protsenko, S., Novytska, O., Kizielev, M. (2019). Peculiarities of the new method of calculating the design heat load of buildings' heating systems according to DSTU EN 12831-1:2017. *Modern Technology, Materials and Design in Construction*, 25(2), 140–144. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2018-2-140-144>

12. Previtali, M., Barazzetti, L., Brumana, R. et al. (2014). Automatic façade modelling using point cloud data for energy-efficient retrofitting. *Appl Geomat*, 6, 95-113. <https://doi.org/10.1007/s12518-014-0129-9>

13. Wojnicz A. (1922). Łuck na Wołyniu: opis historyczno-fizjograficzny. 104.

14. Synii, S. V., Krantovska, O. M., Ksonshkevych, L. M. et al. (2022). Rationale of the structures of fencing of the territory of the Lutsk Zoo, taking into account the analysis of the history of urbanization of the landscape. *Modern technologies and calculation methods in construction*, 17, 138-145. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-7\(17\)-18](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-7(17)-18)

15. Zabokrytska, M. R., Khilchevsky, V. K. (2016). Water Bodies of Lutsk: Hydrography, Local Monitoring, Water Supply, and Water Disposal. *Hidrolohiia, hidrokimiia i hidroekolojiia*, 3(42), 64-76. http://nbuv.gov.ua/UJRN/glghge_2016_3_9

16. Velyka odisseia Kateryny Zubchuk Sapalaivkoii. (2017). *Volyn ZMI*. <https://www.youtube.com/watch?v=nVBKepVUZ0M>

17. Boiaryn, M. V., Voloshyn, V. U., & Tsos, O. O. (2020). Ecological Condition of the Sapalayivka River in the Conditions of Lutsk Urbosystem. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology*, 23, 21-29. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2020-23-02>

18. Shipka, M. Z., Kurhaneych, L. P. (2023). Heoekolohichniy analiz richkovo-basainovoi systemy Poltvy. Monohrafiia. Lviv, 184.

19. Shevchenko R. Yu. (2021). Kyievoznavstvo: prostorova interpretatsiia urbolandshaftu. Monohrafiia. Kyiv, 248.

20. Robinson, A., Myvonwynn, H. (2011). Cheonggyecheon Stream Restoration Project. *Landscape Performance Series*. Landscape Architecture Foundation, <https://doi.org/10.31353/cs0140>

21. Carrasco, M. (2024). Re-Naturalization of Urban Waterways: The Case Study of Cheonggye Stream in Seoul, South Korea. 12 Sep 2024. ArchDaily. <https://www.archdaily.com/1020945/re-naturalization-of-urban-waterways-the-case-study-of-cheonggye-stream-in-seoul-south-korea>

22. Kim, K. R., Kwon, T. H., Kim, Y. H. et al. (2009). Restoration of an inner-city stream and its impact on air temperature and humidity based on long-term monitoring data. *Adv. Atmos. Sci*, 26, 283–292. <https://doi.org/10.1007/s00376-009-0283-x>

23. Uponor Corporation. <https://www.uponor.com/uk-ua>

24. Heneralnyi plan. Osnovne kreslennia (m. Lutsk). (2025). Lutska miska rada (ofitsiynyi sait). <https://www.lutskrada.gov.ua/>
25. KP «Lutskvodokanal». <https://vd.lutsk.ua/>
26. DKP «Lutskteplo». <https://www.teplo-dkp.lutsk.ua/>
27. Synii, S. V., Melnyk, Yu. A., Sunak, P. O., Ksonshkevych, L. M., Krantovska, O. M. (2021). Design of sewerage networks using the principles of SWOT analysis. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 16, 171-179. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2021-6\(16\)-22](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2021-6(16)-22)
28. Sunak P. O., Synii S. V., Melnyk Yu. A. et al. Reconstruction of engineering structures and engineering networks, landscape based on laser scanning technology. *Modern technologies and methods of calculations in construction*. Lutsk, LNTU. 2022. Vol. 18. P.147-161. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-8\(18\)-16](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-8(18)-16)
29. Ksonshkevych, L., Streltsov, K., Krantovska, O. et al. (2023). Physico-chemical studies of the phase composition and structure of cement stone on mechanically activated Portland cement with the addition of ground chamotte. *Reliability and durability of railway transport engineering structure and buildings*, 17-19 Nov. 2021, Kharkiv, Ukraine, AIP Conf. Proc., 2684(1), 040013. <https://doi.org/10.1063/5.0142712>
30. DBN A.2.2-1:2021 Sklad i zmist materialiv otsinky vplyviv na navkolyshnie seredovyshche (OVNS).
31. Autodesk. AutoCAD. <https://www.autodesk.com/education/home>

Література

1. Hermann, M., Pentek, T., Otto, B. (2016). Design principles for industrie 4.0 scenarios. *49th Hawaii international conference on system sciences (HICSS)*, 3928-3937. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2016.488>
2. Broo, D. G., Kaynak, O., Sait, S. M. (2021). Rethinking engineering education at the age of Industry 5.0. *J. Ind. Inf. Integr.*, 25, 100311. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100311>
3. Tran, T.-A. Ruppert, T., Eigner, G., Abonyi, J. (2022). Retrofitting-Based Development of Brownfield Industry 4.0 and Industry 5.0 Solutions," in IEEE Access, 10, 64348-64374. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3182491>
4. Chiorean, L.-D., Vaida, M.-F. (2024). Wastewater Pumping Stations Retrofitting. Development of a Brownfield Industry 4.0 Solution. *25th ICCO, Krynica Zdrój, Poland*, 1-6, <https://doi.org/10.1109/ICCC62069.2024.10569376>
5. Coelho, P., Bessa, C., Landeck, J., Silva, C. (2023). Industry 5.0: The Rise of a Concept. *Procedia Computer Science*, 217, 1137-1144. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.312>
6. Hamilton, S., Charalambous, B., Wyeth, G. (2021). Improving Water Supply Networks: Fit for Purpose Strategies and Technologies. IWA Publishing, 103. <https://doi.org/10.2166/9781780409207>
7. Guo, H., Lin, J.-R., Yu, Y. (2023). Intelligent and Computer Technologies Application in Construction. *MDPI*, 306. <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-8151-4>
8. Мосійчук, І. В., Ужегова, О. А., Ротко, С. В., Синій, С. В., Пахолук, О. А. (2022). Застосування теплових насосів у системах опалення і гарячого водопостачання на прикладі міста Луцька. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 18, 71-80. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-8\(18\)-09](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-8(18)-09)

9. Джеджула, В. В.. (2024). Інтеграція альтернативних джерел енергії в системи теплопостачання громадських будівель. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*, 36(1), 134–138. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2024-1-134-138>
10. Синій, С. В., Гупік, Н. В., Орешкович, М. (2025). Обґрунтування вибору альтернативних джерел енергії для будівлі в долині річки Сапалаївки у Луцьку. *Інновації у будівництві: зб. тез доп. X Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф. здобувачів вищ. освіти та молод. уч.*, 15 травня 2025 р., м. Луцьк, ЛНТУ, 155-157. <https://sites.google.com/view/iic-2025>
11. Проценко, С.Б., Новицька, О.С., Кізеєв, М.Д. (2019). Особливості нової методики розрахунку проектного теплового навантаження систем опалення будівель за ДСТУ EN 12831-1:2017. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*, 25(2), 140-144. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2018-2-140-144>
12. Previtali, M., Barazzetti, L., Brumana, R. et al. (2014). Automatic façade modelling using point cloud data for energy-efficient retrofitting. *Appl Geomat*, 6, 95-113. <https://doi.org/10.1007/s12518-014-0129-9>
13. Wojnicz A. (1922). Łuck na Wołyniu: opis historyczno-fizjograficzny. 104.
14. Синій С. В., Крантовська О. М., Ксьоншкевич Л. М. та ін. (2022). Обґрунтування споруд огороження території Луцького зоопарку з урахуванням аналізу історії урбанізації ландшафту. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 17, 138-145. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-7\(17\)-18](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-7(17)-18)
15. Забокрицька М. Р., Хільчевський В. К. (2016). Водні об'єкти Луцька: гідрографія, локальний моніторинг, водопостачання та водовідведення. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*, 3(42), 64-76. http://nbuv.gov.ua/UJRN/glghe_2016_3_9
16. Велика одіссея Катерини Зубчук Сапалаївкою. (2017). *Волинь ЗМІ*. <https://www.youtube.com/watch?v=nVBKEpVUZ0M>
17. Боярин, М. В., Волошин, В. У., & Цьось О. О. (2020). Екологічний стан річки Сапалаївка в умовах урбосистеми м. Луцьк. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Екологія»*, 23, 21 - 29. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2020-23-02>
18. Шіпка, М. З., Курганевич, Л. П. (2023). Геоекологічний аналіз річково-басейнової системи Полтви. Монографія. Львів, 184.
19. Шевченко Р. Ю. (2021). Києвознавство: просторова інтерпретація урболандшафту. Монографія. Київ, 248.
20. Robinson, A., Myvonnwynn, H. (2011). Cheonggyecheon Stream Restoration Project. *Landscape Performance Series*. Landscape Architecture Foundation, <https://doi.org/10.31353/cs0140>
21. Carrasco, M. (2024). Re-Naturalization of Urban Waterways: The Case Study of Cheonggye Stream in Seoul, South Korea. 12 Sep 2024. ArchDaily. <https://www.archdaily.com/1020945/re-naturalization-of-urban-waterways-the-case-study-of-cheonggye-stream-in-seoul-south-korea>
22. Kim, K. R., Kwon, T. H., Kim, Y. H. et al. (2009). Restoration of an inner-city stream and its impact on air temperature and humidity based on long-term monitoring data. *Adv. Atmos. Sci*, 26, 283–292. <https://doi.org/10.1007/s00376-009-0283-x>
23. Uponor Corporation. <https://www.uponor.com/uk-ua>
24. Генеральний план. Основне креслення (м. Луцьк). (2025). Луцька міська рада (офіційний сайт). <https://www.lutskrada.gov.ua/>
25. КП «Луцькводоканал». <https://vd.lutsk.ua/>

26. ДКП «Луцьктепло». <https://www.teplo-dkp.lutsk.ua/>
27. Синій, С. В., Мельник, Ю. А., Сунак, П. О., Ксьоншкевич, Л. М., Крантовська, О. М. (2021). Проектування каналізаційних мереж з використанням принципів SWOT-аналізу. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 16, 171-179. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2021-6\(16\)-22](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2021-6(16)-22)
28. Сунак, П. О., Синій, С. В., Мельник, Ю. А. та ін. (2022). Реконструкція інженерних споруд та мереж, ландшафту на основі технології лазерного сканування. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 18, 147-161. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-8\(18\)-16](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-8(18)-16)
29. Ksonshkevych, L., Streltsov, K., Krantovska, O. et al. (2023). Physico-chemical studies of the phase composition and structure of cement stone on mechanically activated Portland cement with the addition of ground chamotte. *Reliability and durability of railway transport engineering structure and buildings*, 17-19 Nov. 2021, Kharkiv, Ukraine, AIP Conf. Proc., 2684(1), 040013. <https://doi.org/10.1063/5.0142712>
30. ДБН А.2.2-1:2021 Склад і зміст матеріалів оцінки впливів на навколишнє середовище (ОВНС).
31. Autodesk. AutoCAD. <https://www.autodesk.com/education/home>

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 30.05.2025	Received 30.05.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 30.05.2025	Received in revised form 30.05.2025
Прийнято 01.06.2025	Accepted 01.06.2025
Опубліковано 25.06.2025	Published 25.06.2025

S. V. Synii*

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>
Department of Building and Civil Engineering
Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

N. V. Hupik

bachelor's student, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0691-077X>
Department of Building and Civil Engineering
Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

L. M. Ksonshkevych

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9619-4855>
Department of Urban Construction and Economy
Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Didrihsona st., 4, Odesa, Ukraine, 65029

O. M. Krantovska

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6182-7691>
Department of Strength of Materials
Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Didrihsona st., 4, Odesa, Ukraine, 65029

O. A. Uzhegova

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>
Department of Building and Civil Engineering
Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

S. V. Rotko

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1860-7890>
Department of Building and Civil Engineering
Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

*corresponding author, e-mail: sergii.synii@gmail.com

Features of the methodology for integration engineering networks with a heat pump in building in the valley of Sapalayivka River in Lutsk

How to Cite:

Synii, S. V., Hupik, N. V., Ksonshkevych, L. M., Krantovska, O. M., Uzhegova, O. A., Rotko, S. V. (2025). Features of the methodology for integration engineering networks with a heat pump in building in the valley of Sapalayivka River in Lutsk. *Modern technologies and calculation methods in construction*, 23, 285-300. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-25](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-25)

Abstract. Analysis of literary sources revealed stable trends: the technical and technological development of engineering networks in the direction of utilizing smart and intelligent technologies; and increasing requirements for energy efficiency and environmental friendliness of engineering networks and construction objects that integrate these networks. Examples of hydromorphological transformation of urban rivers were analyzed. A conclusion was made about the importance of preserving the Sapalaivka ecosystem for Lutsk.

The features of the existing urban landscape of Lutsk around the Sapalaivka River were analyzed. The condition of the City Park recreation area in the valley of this river was analyzed in more detail. New changes in the urban landscape of the southern slope were noted: it was reinforced with a reinforced concrete wall with buttresses. The construction of a public building with the integration of engineering networks with a heat pump is planned near the slope.

An improved research methodology was developed, which provides for a comprehensive analysis of the characteristics of the research object. Urban planning, environmental, socio-economic, architectural, and construction aspects are analyzed. This scientific approach allows achieving the most balanced technical solutions in the design process. Their implementation will contribute to achieving better results in the integration of engineering networks into construction objects. The design results were obtained in the Udonor software environment. To conduct the analysis within the framework of the developed methodology, it is proposed to involve well-known methodological approaches. Depending on the needs of the analysis, they can be of varying mathematical complexity: from the principles of SWOT analysis to methods of analysis and/or optimization with obtaining objective functions. Optimization is recommended to be carried out in one stage (determine the objective function depending on the factors that are indicators of aspects) or in two stages (when the indicators of aspects are also determined as an objective function from the factors in each aspect). The developed methodology is recommended to be used as a methodological approach to solving complex design solutions for the integration of engineering networks into construction objects. It improves the consistency of such solutions with urban planning and environmental requirements for the urban landscape.

Keywords: engineering networks, methodology, analysis, building, heat pump, river valley, urban planning, ecology, architectural and construction aspect.

УДК 711.4

М. В. Смаль*

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3333-0984>

Кафедра будівництва та цивільної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

О.В. Волчук

студент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1234-5678>

Кафедра архітектури та дизайну

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

О. В. Дзюбинська

к.е.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1478-8452>

Кафедра будівництва та цивільної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

П. О. Сунак

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2405-3380>

Кафедра будівництва та цивільної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

С. Я. Дробишинець

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9060-7716>

Кафедра будівництва та цивільної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

*автор-кореспондент, e-mail: smal.masha2017@mail.com

Інтеграція скла в архітектуру та розвиток урбаністичного простору міст

Цитувати як:

Смаль, М.В., Волчук, О.В., Дзюбинська, О.В., Сунак П.О., Дробишинець С.Я. (2025). Інтеграція скла в архітектуру та розвиток урбаністичного простору міст. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 23, 301-310. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-26](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-26)

© 2025, Смаль М.В., Волчук О.В., Дзюбинська О.В., Сунак П.О., Дробишинець С.Я.

Анотація. У статті розглядаються основні напрями інтеграції скла в сучасну архітектуру та його вплив на розвиток урбаністичного простору міст. Скло, як універсальний і водночас складний архітектурний матеріал, відіграє важливу роль у формуванні нової естетики, функціональності та екологічності будівель, особливо в умовах зростаючої щільності міського середовища. Його застосування дозволяє забезпечити прозорість, легкість конструкцій, покращення природного освітлення та візуальне розширення простору, що відповідає викликам сучасного міського планування.

Акцентується увага на архітектурних тенденціях ХХІ століття, зокрема на поширенні скляних фасадів, дахів, перегородок та інших конструктивних елементів у житлових, громадських, адміністративних та інфраструктурних

спорудах. Проаналізовано приклади з провідних світових мегаполісів, таких як Лондон, Нью-Йорк, Шанхай, а також українських міст – Києва, Львова, Харкова – де архітектура зі значною часткою скляних елементів сприяє оновленню міського середовища, створенню відкритого, світлого, інтерактивного простору.

Особлива увага приділяється питанням енергоефективності та сталого розвитку. Зазначено, що застосування новітніх технологій у виробництві скла (енергозберігаючі, селективні, мультифункціональні скла, триплекс, склопакети з інертним газом) сприяє зниженню енергоспоживання будівель, підвищує їх теплову ізоляцію, зменшує вуглецевий слід та відповідає принципам зеленої архітектури. Скляні конструкції також відкривають широкі можливості для інтеграції відновлюваних джерел енергії – фотогальванічних панелей, активних фасадів та сонячних батарей.

Ключові слова: урбаністика, скло в архітектурі, урбаністичний простір, скляні фасади, енергоефективність, сталість, міське середовище, прозорість, інноваційні матеріали.

Вступ

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми.

Урбаністичний простір сучасних міст стає дедалі складнішим і динамічнішим, вимагаючи від архітектури нових рішень, що поєднують естетику, функціональність та сталість. У цьому контексті скло посідає особливе місце як матеріал, що не лише змінює зовнішній вигляд будівель, а й впливає на якість міського середовища. Його використання у фасадних системах, дахах, перегородках і навіть пішохідних просторах стає візитівкою сучасної архітектури.

У роботі проаналізовано роль скла в архітектурних рішеннях стосовно формування сучасного урбаністичного середовища. Розглянуто актуальні підходи до інтеграції скла в міські структури, а також його вплив на розвиток публічного простору та естетичну привабливість міст.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є виявлення перспектив, пов'язаних із активним використанням скла як інструменту архітектурного перетворення, а також можливостей його подальшої інтеграції в архітектурну практику міст.

Завдання дослідження:

1. Дослідити історичні етапи та еволюцію використання скла в архітектурі.
2. Проаналізувати сучасні технології виробництва та застосування скляних конструкцій у міському середовищі.
3. Визначити переваги та недоліки інтеграції скла в архітектурне проектування.
4. Оцінити вплив скляних конструкцій на енергоефективність, екологічність та комфорт міського середовища.
5. Сформулювати рекомендації щодо ефективного застосування скла в архітектурі сучасних міст.

Матеріали та методи

Для дослідження використано комплексний підхід, що поєднує аналіз архітектурних теорій, будівельних стандартів, інженерних рішень і прикладів реалізованих об'єктів. Передусім було здійснено аналіз наукових джерел для систематизації існуючих підходів до використання скляних конструкцій у сучасній архітектурі. Це дало змогу окреслити загальні тенденції та виявити ключові аспекти, на яких базується проектування прозорих фасадів.

Паралельно проводився порівняльний аналіз об'єктів із різними типами скління, що допоміг простежити взаємозв'язок між функціональним призначенням будівель, характером їхнього скляного оздоблення та впливом на навколишній простір.

З метою оцінки візуального впливу прозорих фасадів застосовувався візуально-композиційний метод, який дозволив проаналізувати, яким чином скляні поверхні формують архітектурний образ споруди.

Для аналізу конкретних прикладів інтеграції скла у проектну практику використовувався метод кейс-стаді, що дало можливість детально розглянути особливості реалізації таких рішень на практиці.

Результати та обговорення

Історично скло використовувалося лише як декоративний та світлопроникний елемент. У готичних соборах воно служило не лише матеріалом, а засобом передачі духовного змісту: кольорові вітражі наповнювали простір світлом, що змінювало атмосферу інтер'єру. З початком індустріальної епохи скло перестає бути рідкістю - воно стає символом прогресу. Такі споруди, як Кришталевий палац у Лондоні (рис.1), змінюють уявлення про межі можливого: архітектура раптом набуває прозорості, легкості, візуальної відкритості. У XX столітті модернізм робить скло частиною своєї філософії - скляні фасади символізують відкритість та технологічність. Сьогодні скло вийшло за межі простої функції - воно перетворилося на активний елемент сталого проектування, за допомогою якого можна регулювати тепло, світло, навіть адаптуватися до змін навколишнього середовища, зберігаючи водночас естетичну цінність.

У результаті дослідження вдалося виявити кілька сталих тенденцій у використанні скла в сучасному міському будівництві, які мають не лише естетичне, а й функціональне значення. Прозорість фасадів поступово перетворюється з декоративного елементу на інструмент комунікації між внутрішнім простором будівлі та зовнішнім середовищем.

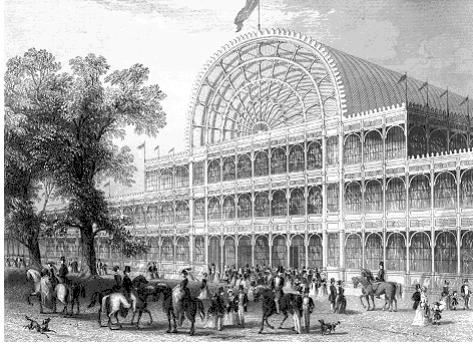


Рис. 1. 1851р. Кришталевий Палац у Лондоні

Зокрема, у громадських об'єктах, таких як офісні центри, культурні комплекси, освітні установи (рис.2), скло не лише виконує функцію огороження, а й створює візуальну відкритість, сприяє залученню користувача, підвищує відчуття простору та прозорості інституції.

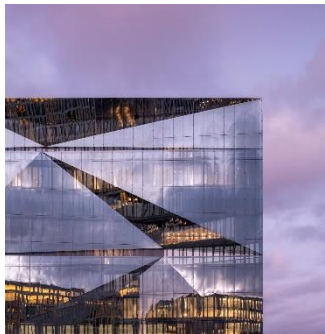


Рис. 2. Приклад використання скла в архітектурі

Порівняльний аналіз об'єктів показав, що характер скління суттєво впливає на сприйняття функції будівлі. Наприклад, для адміністративних чи ділових центрів типово використовуються великі, суцільні скляні фасади з дзеркальними або тонованими покриттями, що підкреслює статусність та сучасність архітектури, але водночас може зменшувати контакт з вулицею (рис.3). Натомість у випадках житлових будинків або громадських просторів все частіше зустрічається комбіноване використання прозорих і напівпрозорих елементів, що забезпечує баланс між приватністю та відкритістю (рис.4).



Рис. 3. Приклад ділового центру,
хмарочос Сент Мері Екс 30 у Лондоні



Рис. 4. Інтеграція скла в
житлові будинки

Під час аналізу кейсів (зокрема, реалізованих проєктів у Києві, Львові та Варшаві) було помічено, що скляні фасади дозволяють адаптувати будівлю до її оточення. Завдяки властивості відбивати навколишнє середовище або навпаки - розчинятися в ньому - скло стає активним інструментом взаємодії з ландшафтом і сусідньою забудовою. Особливо виразною є ця взаємодія в умовах щільної історичної забудови, де сучасні скляні об'єкти, за умов коректного масштабування і кольорового рішення, не суперечать контексту, а доповнюють його.

У межах візуально-композиційного аналізу зверталася увага також на ритм, масштабність і пропорції прозорих поверхонь. Надмірне скління без відповідного членування фасаду створює враження холодності та одноманітності, що особливо відчутно в міському середовищі з активною пішохідною зоною. Натомість використання декоративних елементів, зміни глибини фасаду, поєднання скла з деревом або металом дозволяє створити багатшаровий візуальний ефект, який надає споруді унікальності та людяності.

Приклади успішного застосування скла в урбаністичних просторах яскраво демонструють, як цей матеріал може перетворювати міське середовище.

The Shard у Лондоні (рис. 5) – це не просто хмарочос із скляним фасадом, а справжній символ сучасності, який одночасно відображає небо і місто, створюючи динамічний діалог між будівлею і довкіллям. Apple Park у Купертіно (рис.6) використовує прозорі фасади для органічного поєднання внутрішнього офісного простору з природою, що підвищує комфорт і надихає на креативність. Награ Hall у Рейк'явіку (рис.7) – приклад, де скло стає не просто огорожувальним елементом, а справжньою арт-інсталяцією, яка змінює колір і форму залежно від освітлення, створюючи унікальну атмосферу в міському просторі.



Рис. 5. The Shard, Лондон



Рис. 6. Apple Park, Купертіно

Ці проекти демонструють, що скло не лише формує візуальну відкритість, а й допомагає будівлям «спілкуватися» з містом, роблячи його більш живим і сучасним.



Рис. 7. Harpa Hall, Рек'явік

Скло, як матеріал, надає нові можливості для енергозбереження. Завдяки застосуванню сучасних технологій, таких як багатошарові склопакети з енергозберігаючими покриттями, «розумне скло», фотохромні або електрохромні системи, вдається значно знизити втрати тепла в зимовий період та зменшити перегрів улітку. Згідно з дослідженнями, використання низькоемісійного (Low-E) скла дозволяє зменшити щорічне споживання енергії на опалення до 23%, а на охолодження — до 51%, залежно від кліматичних умов та типу будівлі. Це робить скляні конструкції не лише візуально привабливими, а й функціонально обґрунтованими з погляду сталого проектування.

Важливим у використанні скла є і художнє бачення майбутнього архітектурного середовища, зокрема - візуальний стиль комп'ютерної гри *Mirror's Edge Catalyst*. Архітектура у цій грі - це світ білосніжних поверхонь, чистих ліній, великих скляних площин і потоків природного

світла, які підкреслюють легкість, відкритість і технологічність простору. Такі образи не тільки формують естетичне уявлення про сучасне місто, а й мотивують до вивчення реальних способів інтеграції скла як засобу створення подібних ефектів у реальному середовищі (рис.8). Це підтверджує, що ідеї футуристичності можуть бути застосовані в практиці архітектурного проектування вже сьогодні.

Скло в сучасній архітектурі міста виступає багатогранним інструментом. Воно формує нову мову просторової комунікації, адаптується до різних контекстів, дозволяє працювати як з формою, так і з функцією будівлі. Проте водночас успішність його використання напряму залежить від професійного рівня проектування, чутливості до міського контексту та здатності враховувати потреби користувача. Інтеграція скла потребує не лише технічної компетентності, а й архітектурної культури.

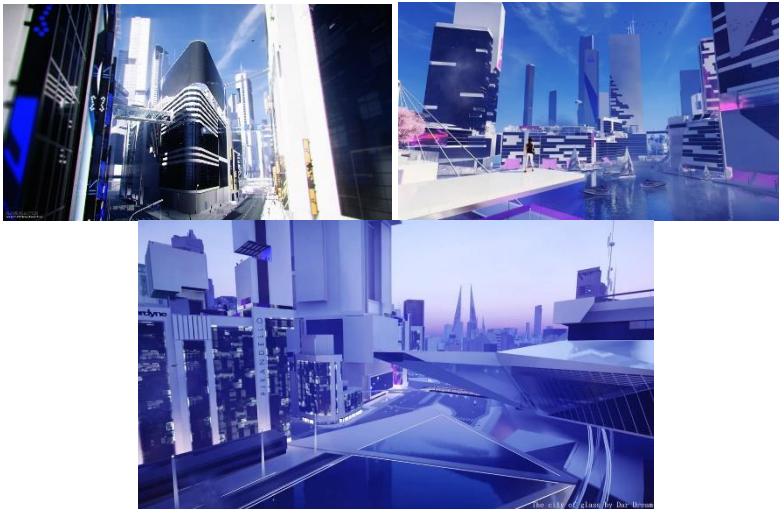


Рис. 8. Кадри з гри *Mirror's Edge Catalyst*

Висновки

Скло в сучасній архітектурі - це значно більше, ніж просто прозорий матеріал. Воно стало повноцінним інструментом формування міського середовища, здатним впливати як на візуальне сприйняття, так і на функціональність простору. Його застосування сьогодні це не лише про красу, а й про ефективність, сталий розвиток і відкритість міста до людини.

Пройшовши шлях від вітражів у готичних соборах до складних високотехнологічних фасадів, скло еволюціонувало разом із самою архітектурою. Завдяки сучасним інженерним рішенням, воно здатне бути не

лише красивим, а й «розумним» - енергоефективним, динамічним, відповідальним до довкілля. Його інтеграція в архітектурне середовище створює передумови для появи нової якості міського простору - більш легкого, прозорого, відкритого до взаємодії.

За склом майбутнє. Але ефективність його використання напряму залежить від рівня архітектурного мислення, глибини розуміння контексту та бажання створити не просто ефектну будівлю, а простір для життя. У цьому сенсі скло - це водночас і матеріал, і метафора: про світло, про прозорість процесів, про архітектуру, яка не ховається, а говорить з містом і його мешканцями.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. DBN V.2.6-31:2021 "Thermal insulation of buildings". – Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2021.
2. EN 1279: Glass in building – Insulating glass units – Part 1–6. – European Committee for Standardization (2018).
3. LEED v4 for Building Design and Construction. – U.S. Green Building Council. – <https://www.usgbc.org/>
4. BREEAM New Construction Technical Manual SD5078. – BRE Global Ltd., 2018. <https://www.breeam.com/>
5. Guardian Glass – Technical characteristics of glass. – <https://www.guardianglass.com>
6. AGC Glass Europe – Products and innovations. – <https://www.agc-yourglass.com>
7. Saint-Gobain Glass – Solutions for Sustainable Building. – <https://www.saint-gobain-glass.com>
8. Foster, N. Norman Foster: A Global Architecture. – Prestel, 2013.
9. Piano, R. Renzo Piano: The Art of Making Buildings. – Royal Academy of Arts, London, 2018.
10. Yeang, K. Ecodesign: A Manual for Ecological Design. – Wiley-Academy, 2006.
11. Mostafavi, M., & Doherty, G. Ecological Urbanism. – Harvard University Graduate School of Design, 2010.

12. Frampton, K. *Modern Architecture: A Critical History*. – Thames & Hudson, 2007.
13. Gehl, J. *Cities for People*. – Island Press, 2010.
14. Офіційний сайт проєкту The Shard – <https://www.the-shard.com>
15. Apple Park by Foster + Partners – Architectural review. – <https://www.fosterandpartners.com>
16. Harpa Concert Hall and Conference Centre – Architectural documentation. – <https://en.harpa.is>
17. EA DICE. *Mirror's Edge Catalyst* [Video game]. – Electronic Arts, 2016.

Література

18. ДБН В.2.6-31:2021 «Теплова ізоляція будівель». – Київ: Мінрегіон України, 2021.
19. EN 1279: Glass in building – Insulating glass units – Part 1–6. – European Committee for Standardization, 2018.
20. LEED v4 for Building Design and Construction. – U.S. Green Building Council. – <https://www.usgbc.org/>
21. BREEAM New Construction Technical Manual SD5078. – BRE Global Ltd., 2018. – <https://www.breeam.com/>
22. Guardian Glass – Технічні характеристики скла. – <https://www.guardianglass.com>
23. AGC Glass Europe – Продукти та інновації. – <https://www.agc-younglass.com>
24. Saint-Gobain Glass – Solutions for Sustainable Building. – <https://www.saint-gobain-glass.com>
25. Foster, N. *Norman Foster: A Global Architecture*. – Prestel, 2013.
26. Piano, R. *Renzo Piano: The Art of Making Buildings*. – Royal Academy of Arts, London, 2018.
27. Yeang, K. *Ecodesign: A Manual for Ecological Design*. – Wiley-Academy, 2006.
28. Mostafavi, M., & Doherty, G. *Ecological Urbanism*. – Harvard University Graduate School of Design, 2010.
29. Frampton, K. *Modern Architecture: A Critical History*. – Thames & Hudson, 2007.
30. Gehl, J. *Cities for People*. – Island Press, 2010.
31. Офіційний сайт проєкту The Shard – <https://www.the-shard.com>
32. Apple Park by Foster + Partners – Архітектурний огляд. – <https://www.fosterandpartners.com>
33. Harpa Concert Hall and Conference Centre – Архітектурна документація. – <https://en.harpa.is>
34. EA DICE. *Mirror's Edge Catalyst* [Відеогра]. – Electronic Arts, 2016.

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 28.05.2025	Received 28.05.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 30.05.2025	Received in revised form 30.05.2025
Прийнято 02.06.2025	Accepted 02.06.2025
Опубліковано 25.06.2025	Published 25.06.2025

M.V. Smal*

Ph.D., Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-333-0984>
Department of Construction and Civil Engineering
Lutsk National Technical University, ul. Lvivska, 75, Lutsk, Ukraine, 43018

O.V. Volchuk

student, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1234-5678>

Department of Architecture and Design

Lutsk National Technical University, ul. Lvivska, 75, Lutsk, Ukraine, 43018

O.V. Dziubynska

Ph.D., Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1478-8452>

Department of Construction and Civil Engineering

Lutsk National Technical University, ul. Lvivska, 75, Lutsk, Ukraine, 43018

P. O. Sunak

Ph.D., Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2405-3380>

Department of Construction and Civil Engineering

Lutsk National Technical University, ul. Lvivska, 75, Lutsk, Ukraine, 43018

S.Y. Drobyshynets

Ph.D., Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9060-7716>

Department of Construction and Civil Engineering

Lutsk National Technical University, ul. Lvivska, 75, Lutsk, Ukraine, 43018

*corresponding author, e-mail: smal.masha2017@mail.com

Integration of glass into architecture and urban development

How to Cite:

Smal M.V., Volchuk O.V., Dziubynska O.V., Sunak P.O., Drobyshynets S.Y. (2025). Integration of glass into architecture and urban development. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 23, 301-310. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-26](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-26)

Abstract. The article examines the main directions of glass integration into modern architecture and its impact on the development of urban space of cities. Glass, as a universal and at the same time complex architectural material, plays an important role in the formation of new aesthetics, functionality and environmental friendliness of buildings, especially in conditions of increasing density of the urban environment. Its use allows for transparency, lightness of structures, improved natural lighting, and visual expansion of space, which meets the challenges of modern urban planning.

Attention is focused on architectural trends of the 21st century, in particular, on the spread of glass facades, roofs, partitions, and other structural elements in residential, public, administrative, and infrastructure buildings. Examples from leading world megacities, such as London, New York, as well as Ukrainian cities – Kyiv, Lviv, Kharkiv – where architecture with a significant proportion of glass elements contributes to the renewal of the urban environment, the creation of an open, bright, interactive space are analyzed.

Particular attention is paid to issues of energy efficiency and sustainable development. It is noted that the use of the latest technologies in glass production (energy-saving, selective, multifunctional glass, triplex, double-glazed windows with inert gas) helps reduce the energy consumption of buildings, increases their thermal insulation, reduces the carbon footprint and complies with the principles of green architecture. Glass structures also open up wide opportunities for the integration of renewable energy sources – photovoltaic panels, active facades and solar batteries.

Keywords: urbanism, glass in architecture, urban space, glass facades, energy efficiency, sustainability, urban environment, transparency, innovative materials.

УДК 625.7/8

Р. В. Смолянюк

к.т.н., доцент, завідувач кафедри, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7087-7834>

Кафедра будівництва та експлуатації автомобільних доріг ім. О.К. Біруля

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, Харків, Україна, 61002

*автор-кореспондент, e-mail: smalia@ukr.net

Розробка нової технології визначення параметрів зчеплення колеса автомобіля з дорожнім покриттям

Цитувати як:

Смолянюк, Р. В. (2025). Розробка нової технології визначення параметрів зчеплення колеса автомобіля з дорожнім покриттям. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 23, 311-320. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-27](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-27)

© 2025, Смолянюк, Р. В.

Анотація. Зчінні властивості дорожніх покриттів є однією з найважливіших транспортно-експлуатаційних характеристик, що безпосередньо впливає на безпеку руху автотранспорту. Вони визначають здатність коліс транспортного засобу утримуватись на поверхні покриття під час руху, прискорення, гальмування або зміни напрямку. В статті запропоновано нову технологію визначення зчінних властивостей, яка базується на сучасному обладнанні для визначення рівності покриттів. Сучасні лазерні датчики мають частоту і дискретність вимірювань високих порядків, що дозволяє отримувати макротекстуру покриття у вигляді профілів. За отриманими профілями згідно чинних європейських і вітчизняних нормативних документів можна розраховувати параметри шорсткості дорожніх покриттів, в тому числі MPD та інші. Обробка отриманих даних по шорсткості дозволяє виділяти характерні ділянки поверхні покриття. Коефіцієнт зчеплення колеса автомобіля з покриттям вимірюється на бідь-якій з характерних ділянок, яка відноситься до певної категорії за параметрами шорсткості. За умови однакового матеріалу, віку і категорії параметрів шорсткості, можна стверджувати, що такі ділянки будуть мати ідентичні значення коефіцієнтів зчеплення. Таким чином можна суттєво зменшити об'єм вимірювань без втрати дискретності. Для реалізації описаної технології розроблено спеціалізоване програмне забезпечення, яке повинно інтегруватися у програмне забезпечення ходових дорожніх лабораторій, які виконують вимірювання рівності дорожніх покриттів. Реалізація описаної технології вимірювань дозволяє ефективніше контролювати стан дорожнього полотна, приймати своєчасні управлінські рішення та впроваджувати сучасні технології утримання дорожньої інфраструктури.

Ключові слова: зчінні властивості покриття, коефіцієнт зчеплення, шорсткість, дорожнє покриття.

Вступ

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Зчіпні властивості дорожніх покриттів є однією з ключових транспортно-експлуатаційних характеристик, яка суттєво впливає на безпеку руху автотранспорту. Зокрема, саме від рівня зчеплення коліс із поверхнею дорожнього покриття залежить довжина гальмівного шляху транспортного засобу. Отже, своєчасна оцінка та підтримання оптимального рівня зчіпних властивостей покриттів є вкрай важливим завданням для забезпечення безпечної експлуатації автомобільних доріг [1].

На сьогоднішній день у світовій практиці відсутній уніфікований підхід до визначення зчіпних властивостей дорожніх покриттів, що пояснюється складністю взаємодії гумового колеса з поверхнею, яка залежить від багатьох факторів, зокрема шорсткості (або текстури) покриття, його стану та умов експлуатації конкретної ділянки дороги [2,3]. Також цьому сприяв недостатній розвиток вимірювальних засобів.

Значний термін експлуатації дорожніх покриттів, значна інтенсивність дорожнього руху, нерівномірність розподілу автомобілів по ширині смуги руху призводить до нерівномірного зношення дорожнього покриття [2]. Дослідженнями кафедри будівництва та експлуатації автомобільних доріг ім. О.К. Біруля ХНАДУ встановлено, що коефіцієнт зчеплення по ширині проїзної частини може відрізнятися в декілька разів (рис. 1,2).

Огляд сучасних наукових досліджень та аналіз накопичених експериментальних даних свідчать, що для отримання повної та достовірної інформації щодо зміни коефіцієнта тертя-ковзання і параметрів шорсткості необхідно проводити вимірювання цих показників по всій площі дорожнього полотна [4,5]. Водночас, на сучасному етапі розвитку технологій практично відсутні прилади, здатні забезпечити безперервний та повномасштабний контроль зчеплення коліс із дорожнім покриттям на всій його поверхні.

Це створює актуальну задачу розробки нових методів та технічних засобів для комплексного та ефективного моніторингу зчіпних характеристик, що є важливою складовою підвищення безпеки дорожнього руху.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є розробка нової технології виконання вимірювань параметрів зчіпних властивостей дорожніх покриттів, яка б дозволила підвищити дискретність вимірювань без значної витрати ресурсів. Завданнями дослідження є: розробка технології і програмного забезпечення для використання сучасних дорожніх ходових лабораторій для отримання даних щодо зчіпних властивостей покриттів.



Рис. 1. Результати вимірювання коефіцієнта зчеплення на автомобільній дорозі II категорії в Харківській області



Рис. 2. Результати вимірювання коефіцієнта зчеплення на автомобільній дорозі I категорії в Донецькій області

Матеріали та методи

Значний розвиток у галузі вимірювальної техніки, а особливо в сегменті безконтактних методів контролю поверхонь, відкриває нові перспективи для більш ефективної оцінки шорсткості. Сьогодні в світі накопичений значний досвід щодо використання лазерних систем для оцінки рівності дорожніх покриттів (рис. 3).



Рис. 3. Сучасні лазерні системи для визначення рівності дорожніх покриттів

За останні роки характеристики лазерних датчиків – основного компонента вищезгаданих систем – значно покращилися. Із збільшенням частоти вимірювань і розподільчої здатності характеристики лазерних датчиків наблизилися до таких, які дозволяють вимірювати мікропрофіль поверхні, або шорсткість покриття (рис. 4).

Таким чином, подібні установки одночасно із вимірюванням рівності можуть безперервно виконувати вимірювання шорсткості покриття. Згідно чинних нормативних документів [6-8] для визначення параметрів шорсткості необхідно мати мікропрофіль поверхні довжиною близько 200 мм.

Середня глибина профілю (MPD) є основним показником, що характеризує шорсткість дорожнього покриття.

Переваги використання MPD для оцінки шорсткості:

- вимірювання MPD може здійснюватися безперервно вздовж усієї довжини покриття із застосуванням мобільних технологій при звичайній швидкості руху. Це вигідно відрізняє її від методу плями, який є локальним, потребує зупинки транспорту та тимчасового обмеження дорожнього руху;
- значення MPD дає змогу обчислити раніше використовуваний показник – середню глибину шорсткості, що дозволяє порівнювати нові результати з історичними даними;
- MPD є узагальненим кількісним показником, який добре ілюструє шорсткість поверхні, хоча й не розкриває її якісних характеристик;

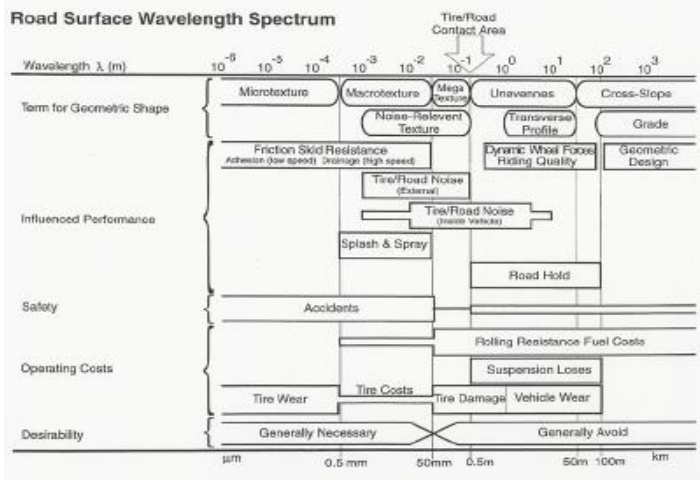


Рис. 4. Спектр довжин хвиль дорожнього покриття

- показник ефективно описує залежність коефіцієнта зчеплення від швидкості руху на вологій поверхні;
- використання MPD дає можливість порівнювати значення коефіцієнта зчеплення, отримані за допомогою різних типів обладнання, що відрізняються за принципом дії та точністю.

В результаті ми можемо отримати велику кількість даних, достатню для будь-якого аналізу. Але для повного визначення зчепних властивостей необхідно також значення коефіцієнта зчеплення або іншого аналогічного показника. Обладнання для визначення коефіцієнта зчеплення або інших аналогічних характеристик має незначну продуктивність, що необхідно враховувати під час вимірювань [9-10]. Тому була розроблена нова технологія виконання вимірювань.

Цей процес складається з наступних етапів:

1 етап. Безперервне визначення показника шорсткості MPD з використанням вдосконалених лазерних систем для оцінки рівності покриттів.

2 етап. Усереднення даних на ділянках, довжиною 10 м.

3 етап. За допомогою спеціально розробленого програмного забезпечення виконуємо аналіз початкових даних. Встановлюємо граничні значення для розрахункового діапазону (рис. 5).

4 етап. На основі усереднених даних і нормативних вимог встановлюємо кількість категорій (рис. 6).

5 етап. В результаті розрахунків отримуємо кількість ділянок, де необхідно виконати вимірювання (рис. 7). Результат можна вивантажити у вигляді підсумкової відомості.

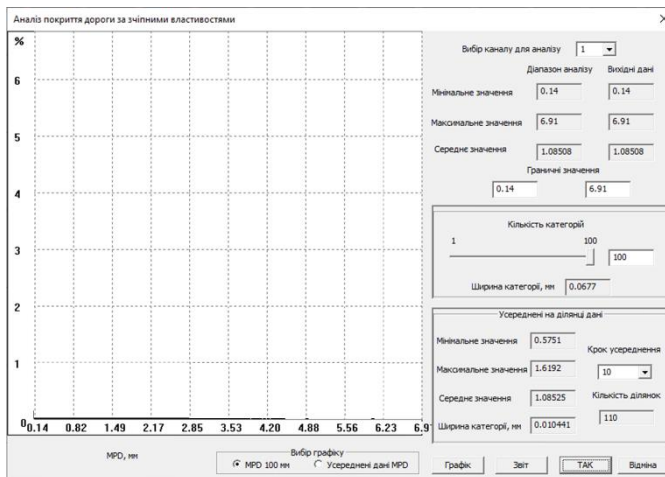


Рис.5.Робоче вікно програмного забезпечення для аналізу зчпних властивостей покриття

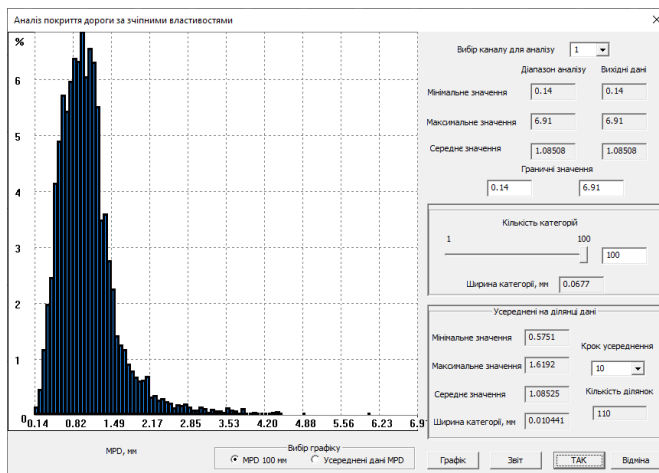


Рис.6. Робоче вікно програмного забезпечення із даними. Встановлено максимальна кількість категорій

Для отримання повних даних про зчпні властивості на будь-якій ділянці, що відповідає певній категорії по шорсткості, необхідно виконати вимірювання коефіцієнта зчеплення. За умов однакового матеріалу покриття отримані дані можна розповсюдити на всю досліджувану ділянку. В результаті отримуємо повну інформацію про зчпні властивості покриття

кожні 200 мм – тобто максимально деталізовану інформацію про зчіпні властивості.

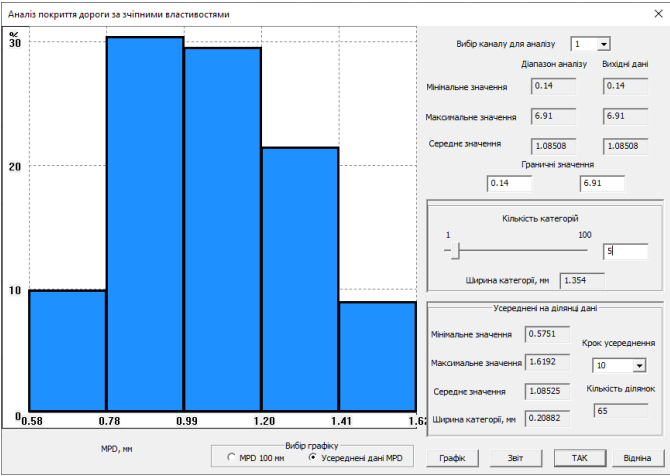


Рис. 7. Робоче вікно програмного забезпечення із даними.
Встановлено 5 категорій

Результати та обговорення

Важливим є питання кордонів категорій. Кордони категорій залежать від матеріалу покриття. На цей час це питання потребує подальшого дослідження. Але є і рекомендовані порогові значення глибини текстури, які залежать від особливостей країни, кліматичних умов і інших факторів. Наприклад, для англійських магістральних доріг застосовуються діапазони параметру MPD, наведені на рисунку 8.

MTD, мм	Рівень	Опис
> 1,1	1	Відмінно. Значний рівень шуму
0,8-1,1	2	Добре
0,4-0,8	3	Задовільно. Рівень попередження. Можливе значне зниження зчіпних якостей в складних погодних умовах
<0,4	4	Незадовільно. Рівень прийняття рішення щодо обмеження швидкості та ремонтних робіт

Рис.8. Рекомендований діапазон параметрів шорсткості для англійських магістральних доріг

Висновки

Використання сучасних методів і технологій вимірювання шорсткості дорожніх покриттів дозволяє отримати велику кількість точних і детальних даних. Подальший аналіз і обробка цих даних дають змогу класифікувати досліджувану ділянку дороги за категоріями шорсткості. Оскільки шорсткість поверхні безпосередньо впливає на інші параметри зчеплення колеса з покриттям (за умови, що тип і вік покриття залишаються однаковими), можна з упевненістю стверджувати, що ділянки, віднесені до однієї категорії, матимуть подібні значення коефіцієнта зчеплення. Запровадження такого підходу значно оптимізує процес оцінки зчепних властивостей дорожніх покриттів, скорочуючи обсяги та вартість вимірювань без втрати точності. Це, у свою чергу, сприяє більш ефективному контролю якості дорожнього полотна, своєчасному прийняттю управлінських рішень та підвищенню безпеки руху на автомобільних дорогах.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. International PIARC Experiment to Compare and Harmonize Texture and Skid Resistance Measurements // PIARC Publication 01.04.T, Permanent International Association of Road Congresses. – Paris (France), 1995. – P. 128-158. [in English].
2. Smolianiuk R.V. Otsinka ekspluatatsiinoho stanu dorozhnikh pokryttiv na osnovi vdoskonalennia metodiv vymirivannia rivnosti ta zchipykh yakosti: dys. ... kandydata tekhn. nauk: 26.10.05 / Smolianiuk Roman Volodymyrovych. Kh., 2005. – 157 s.
3. Smolianiuk R.V. Rozrobka kompleksnoho pokaznyka dlya otsinky zchipykh vlastyvostry pokryttiv avtomobil'nykh dorih / R.V. Smolianiuk, V.M. Mytrofanov//Mosti, tuneli i dorohy: stan, problemy utrymannya ta perspektyvy pidvyshchennya dohovichnosti: Vseukr. nauk.-prakt. Internet konf., 25 trav. 2018 r./Kharkiv. nats. avtomob.-dor. un-t. – Kharkiv, 2018. S. 139–144.
4. Congzhen, Liu & Gao, Chen & Hongzhu, Liu & Qiang, Ma & Chengwei, Xu & Hui, Meng & Guol, Wang. (2024). Investigating Tire Ground Contact Mechanics Under Partial

Hydroplaning Conditions: A Multivariate Analysis Approach. Insights of Automation in Manufacturing. 1. 106-117. 10.59782/iam.v1i1.212. [in English].

5. Vilsan, Alexandru & Sandu, Corina. (2023). Hydroplaning of Tires: A Review of Numerical Modeling and Novel Sensing Methods. 10.1115/DETC2023-116314. [in English].

6. DSTU EN ISO 13473-1:2021 Vyznachennya kharakterystyky shorstkosti dorozhn'oho pokryttya dlya profiliv yoho poverkhni. Chastyna 1. Vyznachennya seredn'oyi hlybyny (EN ISO 13473-1:2019, IDT; ISO 13473-1:2019, IDT).

7. DSTU ISO 13473-2:2021 Vyznachennya kharakterystyky shorstkosti dorozhn'oho pokryttya za profilyamy yoho poverkhni. Chastyna 2. Terminolohiya ta osnovni vymohy shchodo analizu profiliv shorstkosti pokryttya (ISO 13473-2:2002, IDT).

8. DSTU ISO 13473-3:2021 Vyznachennya kharakterystyky shorstkosti dorozhn'oho pokryttya za profilyamy yoho poverkhni. Chastyna 3. Spetsyfikatsiya ta klasyfikatsiya profilometriv (ISO 13473-3:2002, IDT).

9. DSTU 3587:2022 Bezpeka dorozhnogo rukhu. Avtomobilni dorohy. Vymohy do ekspluatatsiinogo stanu. [Chynnyi vid 2022-12-01]. Vyd. ofits. Kyiv : DP «UkrNDNTs», 2022. 31 s.

10. DSTU 8746:2017 Avtomobil'ni dorohy. Metody vymiryuvannya zchpnykh vlastyvostry poverkhni dorozhn'oho pokryttya. [Chynnyi vid 2019-01-01]. Vyd. ofits. Kyiv : DP «UkrNDNTs», 2017. 16 s.

Література

1. International PIARC Experiment to Compare and Harmonize Texture and Skid Resistance Measurements // PIARC Publication 01.04.T, Permanent International Association of Road Congresses. – Paris (France), 1995. – P. 128-158. [in English].

2. Смолянюк Р.В. Оцінка експлуатаційного стану дорожніх покриттів на основі вдосконалення методів вимірювання рівності та зчпних якостей: дис. кандидата техн. наук: 26.10.05 / Смолянюк Роман Володимирович. Х., 2005. – 157 с.

3. Смолянюк Р.В. Розробка комплексного показника для оцінки зчпних властивостей покриттів автомобільних доріг / Р.В. Смолянюк, В.М. Митрофанов//Мости, тунелі і дороги: стан, проблеми утримання та перспективи підвищення довговічності: Всеукр. наук.-практ. Інтернет конф., 25 трав. 2018 р./Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т.– Харків, 2018. – С. 139–144.

4. Congzhen, Liu & Gao, Chen & Hongzhu, Liu & Qiang, Ma & Chengwei, Xu & Hui, Meng & Guol, Wang. (2024). Investigating Tire Ground Contact Mechanics Under Partial Hydroplaning Conditions: A Multivariate Analysis Approach. Insights of Automation in Manufacturing. 1. 106-117. 10.59782/iam.v1i1.212. [in English].

5. Vilsan, Alexandru & Sandu, Corina. (2023). Hydroplaning of Tires: A Review of Numerical Modeling and Novel Sensing Methods. 10.1115/DETC2023-116314. [in English].

6. ДСТУ EN ISO 13473-1:2021 Визначення характеристик шорсткості дорожнього покриття за профілями його поверхні. Частина 1. Визначення середньої глибини (EN ISO 13473-1:2019, IDT; ISO 13473-1:2019, IDT).

7. ДСТУ ISO 13473-2:2021 Визначення характеристик шорсткості дорожнього покриття за профілями його поверхні. Частина 2. Термінологія та основні вимоги щодо аналізування профілів шорсткості покриття (ISO 13473-2:2002, IDT).

8. ДСТУ ISO 13473-3:2021 Визначення характеристик шорсткості дорожнього покриття за профілями його поверхні. Частина 3. Специфікація та класифікація профілометрів (ISO 13473-3:2002, IDT).

9. ДСТУ 3587:2022 Безпека дорожнього руху. Автомобільні дороги. Вимоги до експлуатаційного стану. [Чинний від 2022-12-01]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022. 31 с.

10. ДСТУ 8746:2017 Автомобільні дороги. Методи вимірювання зчіпних властивостей поверхні дорожнього покриття [Чинний від 2019-01-01]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. 16 с.

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 22.05.2025	Received 22.05.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 23.05.2025	Received in revised form 23.05.2025
Прийнято 01.06.2025	Accepted 01.06.2025
Опубліковано 25.06.2025	Published 25.06.2025

R. V. Smolianiuk

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Head of the Department, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7087-7834>

Department of Construction and Operation of Motor Roads named after O.K. Birulia

Kharkiv National Automobile and Highway University, Yaroslava Mudroho Str., 25, Kharkiv, Ukraine, 61002

Development of a new technology for determining the tire–pavement friction parameters

How to Cite:

Smolianiuk, R. V., (2025). Development of a new technology for determining the tire–pavement friction parameters. *Modern technologies and calculation methods in construction*, 23, 311-320. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-27](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-27)

Abstract. The frictional properties of road surfaces are among the most critical transport-operational characteristics, directly affecting road traffic safety. They determine the ability of vehicle tires to maintain contact with the pavement during movement, especially when accelerating, braking, or changing direction. Insufficient grip can lead to skidding, increased braking distance, and loss of vehicle control, all of which significantly raise the risk of traffic accidents. Currently, there are several methods for evaluating pavement friction, but most of them are labor-intensive, resource-demanding, and do not provide complete coverage of the road surface. Furthermore, many traditional methods rely on spot measurements, which can result in missing potentially hazardous sections.

This article proposes a new approach to assessing the frictional properties of road surfaces based on the use of advanced equipment for non-contact measurement of surface microtexture. Using profilometric data, the system analyzes pavement texture and identifies critical areas with either increased or decreased roughness.

On these selected sections, the coefficient of friction is additionally determined, which allows for a significant reduction in the total number of direct measurements without compromising the accuracy or spatial resolution of the results. The proposed technology improves the efficiency of pavement condition monitoring, optimizes diagnostic costs, and enables timely decision-making regarding road maintenance and repair.

Ultimately, this contributes to enhanced traffic safety and prolongs the service life of the pavement, supporting modern road infrastructure management strategies.

Keywords: frictional properties of payment, friction coefficient, payment texture, road payment.

УДК 624.046.4:539.3:004.94:624.07

А.М. Смоляр

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5714-473X>

Кафедра промислового та цивільного будівництва

Черкаський державний технологічний університет, б-р Шевченка, 460, Черкаси, Україна, 18006

І.В. Мірошкіна*

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7878-4421>

Кафедра статистики та прикладної математики

Черкаський державний технологічний університет, б-р Шевченка, 460, Черкаси, Україна, 18006

Б.В. Середенко

студент

Черкаський державний технологічний університет, б-р Шевченка, 460, Черкаси, Україна, 18006

*автор-кореспондент, e-mail: irina.miroshkina@gmail.com

Натурний експеримент та комп'ютерне моделювання згину балки з будівельним вигином

Цитувати як:

Смоляр А.М., Мірошкіна І.В., Середенко Б.В. (2025) Натурний експеримент та комп'ютерне моделювання згину балки з будівельним вигином. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 23, 321-330. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-28](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-28)

© 2025, Смоляр А.М., Мірошкіна І.В., Середенко Б.В.

Анотація. Проведене експериментальне дослідження ефективності балки з будівельним вигином. Для проведення натурного дослідження прогинів балки розроблена і сконструйована спеціальна експериментальна установка. Зразки балок виготовлено FDM 3D друком із coPET. Надруковано три типи експериментальних зразків балки: з прямою віссю (модельна балка), з вигином 100% та 200%. Моделювалася робота двохопорної балки з жорстко затисненими кінцями під зосередженим навантаженням посередині балки. Вимірювався прогин під навантаженням. Проведені серії завантажень експериментальних зразків балок силою $F=0-200\text{ Н}$ з приростом сили $\Delta F=10\text{ Н}$. Побудовані діаграми залежності прогину модельної та вигнутих балок від навантаження. Виявлено ефект балки нульового прогину. Для перевірки результатів експериментальних випробувань робота досліджуваних балок аналітично та чисельно. Аналітичне моделювання дозволило модифікувати модуль пружності структури матеріалу 3D друку зразків. Результатами комп'ютерного моделювання у ПК ЛІРА узгоджуються з результатами експерименту та результатами аналітичного розрахунку. Візуалізація досліджень виконана у ПК FUSION. Вона в кольорі демонструє розподіл прогинів балки по довжині та ефективність балок з вигином щодо зменшення значень прогинів при збільшенні величини будівельного вигину. Проведені дослідження є черговим вкладом у вивчення явища будівельного вигину. Метою

досліджень є розробка практичних технологій застосування будівельного вигину у реальному будівництві. Показана можливість використання технології 3D друку у натурному моделюванні конструкційних елементів будівельних споруд. Помічена залежність механічних характеристик структур 3D друку від режиму друку та параметрів монолитки.

Ключові слова: будівельний вигин, натурний експеримент, комп'ютерне моделювання, FDM 3D друк, модельна балка, матеріал соPET, розподіл прогинів.

Вступ

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Балки з будівельним вигином є важливим конструкційним елементом з вищими характеристиками надійності, довговічності та естетичності, що компенсують недоліки матеріалів і вплив часу.

Будівельний вигин балки є штучним початковим викривленням осі балки дотори, що закладається на стадії проектування задля запланованого вигідного перерозподілу нормальних напружень, зменшення прогину під навантаженням, а також зменшення матеріаломісткості без втрати несучої здатності, амортизації імпульсів при динамічних навантаженнях, захисту конструкційних матеріалів від втоми, підвищення стійкості при коливаннях, захисту від вібраційних навантажень тощо. Балка працює ефективніше, економиться матеріал і підвищується надійність [1].

Попередньо вигнуті балки використовуються у будівництві залізобетонних прогонових конструкцій мостів, у виробництві металевих балок та ферм, гнутих клеєних дерев'яних балок тощо [2].

Успішне використання вигину вимагає точного моделювання, контролю виготовлення та чіткого монтажу балок і при правильному виконанні може бути надзвичайно ефективним способом зміцнення.

Дослідження ефективності будівельного вигину, потреба розробки технологій практичного використання цього явища у практичному будівництві, згідно [3,4], обґрунтовує актуальність даної теми досліджень.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є аналіз та оцінка ефективності балки з будівельним вигином під навантаженням. Ставиться задача про комп'ютерне та експериментальне моделювання роботи вигнутої балки, визначення впливу величини будівельного вигину на прогин балки.

Матеріали та методи

В якості модельної задачі розглядається напружено-деформований стан двохопорної балки, кінці якої жорстко затиснені (рис. 1, а) [1]. Балка завантажена зосередженою силою $F=100.0$ Н посередині прогону. Вона має довжину $l=15$ см, поперечний переріз прямокутний шириною $b=1.0$ см,

висотою $h=2.0$ см, момент інерції – $I=0.667$ см⁴. Матеріал балки – поліетилентерефталат (сoPET). Модифікований модуль пружності матеріалу балки – $E=0.983$ ГПа. Таку балку будемо називати модельною балкою.

Для побудови балки з будівельним вигином в ПК ЛІРА була розрахована модельна балка [5]. Епюра прогинів балки зображена на рис. 1, б. Також за методом початкових параметрів із диференціального рівняння зігнутої осі балки отримана формула прогинів

$$w(x) = \frac{F}{EI} \left[-\frac{l}{16} x^2 + \frac{1}{12} x^3 - \frac{l}{6} \left(x - \frac{l}{2} \right)^3 \right] \quad (1)$$

та обчислені ординати прогинів модельної балки. Значення ординат прогинів зображених на рис. 1, б та за формулою (1) дуже близькі. Найбільше розрахункове переміщення в балці посередині, у точці прикладення сили F , дорівнює: $w\left(\frac{l}{2}\right)=0.268$ мм.

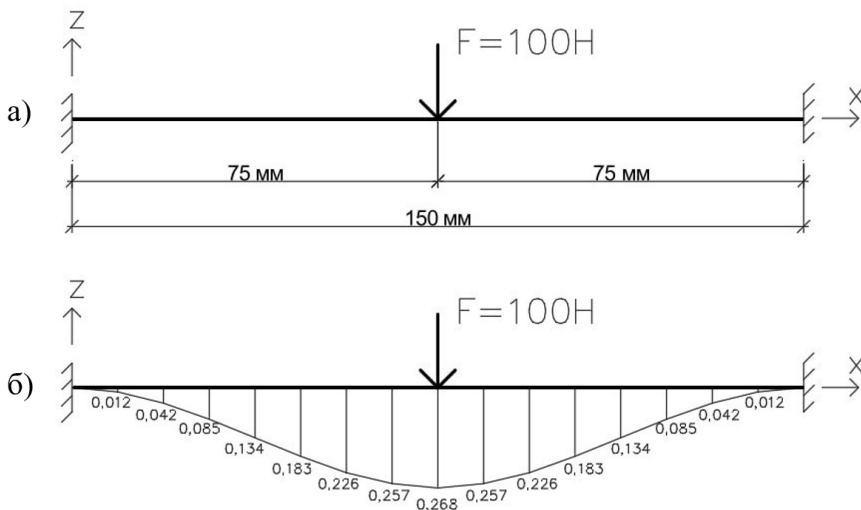


Рис. 1 а, б. Схема (а) та епюра прогинів (б) модельної балки

Епюра прогинів (рис. 1, б) модельної балки при симетричному відображенні відносно осі модельної балки стає осьовою лінією балки з будівельним вигином. Схема вигнутої балки зображена на рис. 2. Така балка буде мати вигин 100%. При збільшенні вигину у два рази отримаємо балку з вигином 200%.

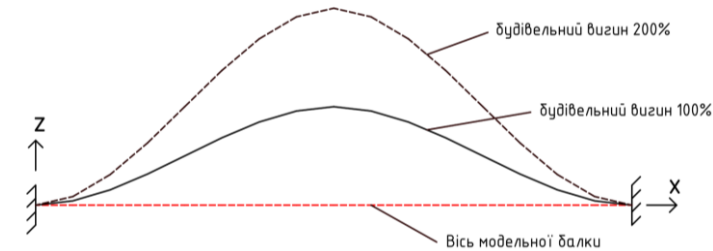


Рис. 2. Схема балки з будівельним вигином 100% та 200%

Натурний експеримент балки з будівельним вигином проведено на модельній балці. Метою експерименту є дослідження поведінки завантаженої балки, перевірка її жорсткості, прогину і загальної ефективності будівельного вигину.

Для натурального експерименту виготовлено із поліетилентерефталату (coPET) FDM 3D друком зразки модельної балки та двох балок з будівельним вигином 100% і 200% (рис. 3) [6].



Рис. 3. Експериментальні зразки модельної балки та балок з вигином 100% і 200%

Для проведення експерименту була розроблена та сконструйована спеціальна установка (рис. 4). Експериментальна установка складається з металевої рамки 1. У середній частині рамки розміщується балка 2. До рамки прикріплені два опорних пристрої 3, що забезпечують жорстке затиснення кінців балки струбцинами 4. Знизу до рамки прикріплюється індикатор годинникового типу 5, зверху розміщений завантажувальний пристрій, що складається з динамометра 6 та завантажувального гвинта 7. Для центрування навантаження виготовлені 3D-друком спеціальні вставки 8, 9.

Принцип роботи експериментальної установки наступний. Модельна балка установлюється на опорні пристрої 3 та жорстко прикріплюється до них струбцинами 4. Навантаження у вигляді центральної зосередженої сили передається з завантажувального гвинта 7 через динамометр 6 на балку 2. Прогин балки знизу вимірюється індикатором годинникового типу 5.



Рис. 4. Установка для дослідження балок з будівельним вигином

Були проведені серії експериментальних вимірювань прогинів для трьох варіантів балок: модельної та з будівельним вигином 100% і 200%. Приріст навантаження вибраний $\Delta F = 10.0$ Н. Розглядалося навантаження до $F = 200$ Н. Результати експериментальних досліджень показують залежність прогинів балок від величини будівельного вигину та навантаження. Ця

залежність зображена у вигляді діаграм на рис. . 5.

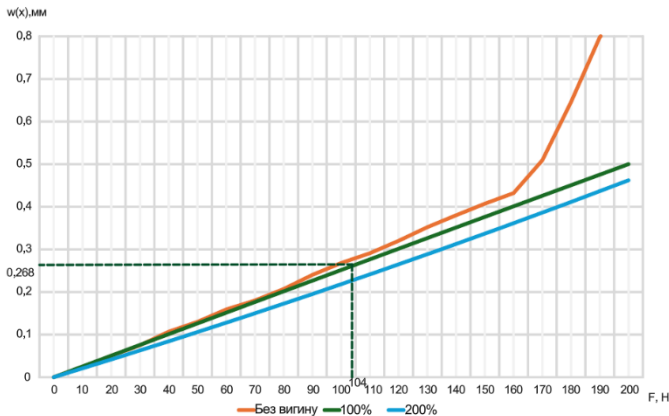


Рис. 5. Діаграми залежності прогинів балок від навантаження

Діаграми на рис. 5 дозволяють зробити висновок про зниження інтенсивності прогинів із збільшенням висоти вигину балки. На діаграмі прогинів модельної балки можливо виділити дві області інтенсивності прогинів. Роздільною точкою цих областей є навантаження приблизно $F=160$ МПа.

Діаграми дозволяють обчислити значення навантаження F при якому лінія прогинів балки з будівельним вигином наближається до осі незавантаженої модельної балки, тобто забезпечується умова для балки з нульовим прогином. Для балки з вигином 100% така зосереджена сила приблизно дорівнює $F=104$ Н (рис. 5).

Комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану модельної балки та балок з будівельним вигином 100% і 200% виконано в ПК ЛІРА. Епюри прогинів для $F=100$ Н приведені на рис. 1, б та рис. 6 [7].

Порівняння отриманих чисельних результатів з експериментальними дозволяє зробити висновки про їх близькість. Експериментальне значення прогину у досліджуваній точці посередині прогону модельної балки дорівнює $w^{\text{експ.}} = 0.262$ мм, а розрахункове – $w^{\text{розн.}} = 0.268$ мм, різниця складає біля $\varepsilon=2.3\%$.

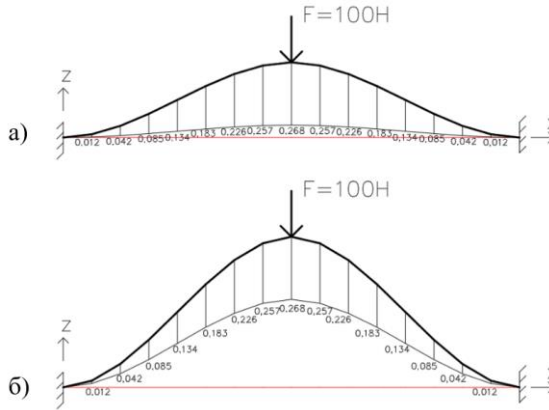


Рис. 6 а, б. Епюри прогинів балки з вигином 100% (а) та балки з вигином 200%

Результати комп'ютерного та натурального моделювання роботи балки з будівельним вигином знайшли підтвердження у візуалізації ПК FUSION. На рис. 7 зображені просторові розподіли переміщень для модельної та вигнутої балки.

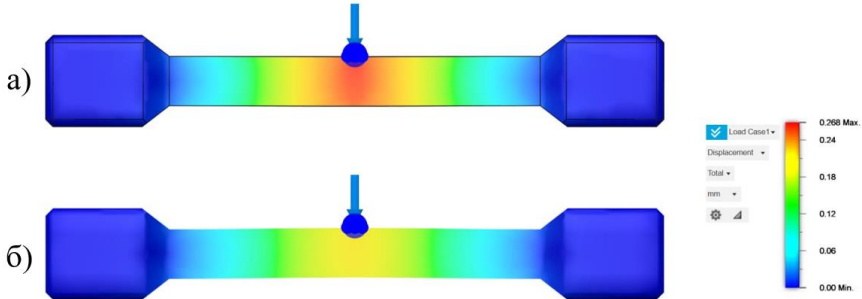


Рис. 7 а, б. Просторова візуалізація розподілу прогинів у модельній балці (а) та балці з будівельним вигином 200% (б)

Така візуалізація дає якісну картину розподілу прогинів у балках. Концентрація червоного кольору відповідає більшим значенням прогинів балки. Концентрація червоного кольору у модельної балки вища ніж у вигнутої. По кольору за шкалою прогинів можливо також визначити приблизні кількісні величини прогинів у перерізах балки.

Результати та обговорення

Результатами виконаних досліджень є натурне та комп'ютерне моделювання розподілу прогинів балок у залежності від висоти будівельного вигину. Доведено залежність прогинів від висоти вигину балок. Матеріалом для зразків балок вибраний пластик coPET. Цей матеріал має високі механічні властивості, що дозволяє його використання для моделювання будівельних конструкцій. Разом з FDM 3D друком проведення натурних експериментальних досліджень значно спростилося, підвищилась мобільність. Але поряд з цим постали проблеми модифікації механічних властивостей структур 3D друку.

Отримані результати ґрунтуються на натурному, аналітичному та чисельному моделюванні роботи вигнутої балки, що підтверджує їх відповідність.

Автори статті працювали єдиним організмом, кожен виконував свою важливу функцію.

Висновки

Проведені дослідження вказують на ефективність конструктивних елементів з будівельним вигином. Дослідження є вкладом у розробку практичних технологій застосування будівельного вигину у реальному будівництві. Показана можливість використання технології 3D друку у натурному моделюванні конструкційних елементів будівельних споруд.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. Smolyar, A. M., Miroshkina, I. V., & Yurchenko, S. V. (2015). Strain state of zero-deflection plates. *Materials Science*, (51), 276–280. <https://doi.org/10.1007/s11003-015-9840-x>
2. Mykhailovskyi D., Komar, M., & Komar, O. (2024). Analysis of stress-strain state of plates made of cross-laminated timber reinforced with composite tapes. *Building*

- constructions. *Theory and practice*, (14), 29–40. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.14.2024.29-40>
3. Zhang, X., Sun, Y., Yang, X., Sun, L., & Wang, P. (2023). Study on the Bending Performance of High-Strength and High-Ductility CRE-Reinforced Concrete Beams. *Buildings*, 13(11), 2746. <https://doi.org/10.3390/buildings13112746>
4. Gomon, S., Marchuk, V., Nalepa, O., Romanyuk, V., & Ziatyuk, Y. (2022). Effective methods to strengthen the bending reinforced concrete elements. *ACTA SCIENTIARUM POLONORUM – Architectura Budownictwo*, (21), 51–56. <https://doi.org/10.22630/ASPA.2022.21.1.6>
5. Барабаш М., Костира Н., & Томашевський, А. (2022). Stress-strain state and strength calculations of damaged structures using “LIRA–SAPR” software tools. *Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture*, (1), 7–14. <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.220222.7.827>
6. Characteristics of coPET – a Unique Monofilament Material for FDM 3D Printing (2018, April 23) monofilament.com.ua <https://monofilament.com.ua/ua/publikatsiji/osoblivosti-copet-unikalnogo-materialu-monofilament-dlja-fdm-3d-druku>

Література

1. Smolyar, A. M., Miroshkina, I. V., & Yurchenko, S. V. (2015). Strain state of zero-deflection plates. *Materials Science*, (51), 276–280. <https://doi.org/10.1007/s11003-015-9840-x>
2. Михайловський, Д., Комар, М., & Комар, О. (2024). Аналіз напружено-деформованого стану плит з перехресно-класної деревини підсилених композитними стрічками. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*, (14), 29–40. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.14.2024.29-40>
3. Zhang, X., Sun, Y., Yang, X., Sun, L., & Wang, P. (2023). Study on the Bending Performance of High-Strength and High-Ductility CRE-Reinforced Concrete Beams. *Buildings*, 13(11), 2746. <https://doi.org/10.3390/buildings13112746>
4. Gomon, S., Marchuk, V., Nalepa, O., Romanyuk, V., & Ziatyuk, Y. (2022). Effective methods to strengthen the bending reinforced concrete elements. *ACTA SCIENTIARUM POLONORUM – Architectura Budownictwo*, (21), 51–56. <https://doi.org/10.22630/ASPA.2022.21.1.6>
5. Барабаш М., Костира Н., & Томашевський, А. (2022). Визначення напружено-деформованого стану та міцності пошкоджених несних конструкцій інструментами ПК «ЛІРА – САПР». *Український журнал будівництва та архітектури*, (1), 7–14. <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.220222.7.827>
6. Особливості coPET – унікального матеріалу MonoFilament для FDM 3D друку. (2018, Квітень 23) monofilament.com.ua <https://monofilament.com.ua/ua/publikatsiji/osoblivosti-copet-unikalnogo-materialu-monofilament-dlja-fdm-3d-druku>

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 21.05.2025	Received 21.05.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 21.05.2025	Received in revised form 21.05.2025
Прийнято 01.06.2025	Accepted 01.06.2025
Опубліковано 25.06.2025	Published 25.06.2025

A.M. Smoliar

D.Sc. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5714-473X>

Department of Industrial and Civil Construction

Cherkasy State Technological University, Shevchenko Boulevard, 460, Cherkasy, Ukraine, 18006

I. V. Miroshkina*

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7878-4421>

Department of Statistics and Applied Mathematics

Cherkasy State Technological University, Shevchenko Boulevard, 460, Cherkasy, Ukraine, 18006

B. V. Seredenko

student

Cherkasy State Technological University, Shevchenko Boulevard, 460, Cherkasy, Ukraine, 18006

*corresponding author, e-mail: irina.miroshkina@gmail.com

Full-Scale Experiment and Numerical Modeling of Beam Bending with Constructional Camber

How to Cite:

Smoliar, A. M., Miroshkina, I. V., Seredenko, B. V. (2025). Full-Scale Experiment and Numerical Modeling of Beam Bending with Constructional Camber. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 23, 321-330. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-28](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-28)

Abstract. An experimental study was conducted to evaluate the effectiveness of beams with constructional camber. A custom test rig was developed and assembled to carry out full-scale investigations of beam deflection. Beam specimens were fabricated using FDM 3D printing technology from coPET material. Three types of experimental beam specimens were produced: with a straight axis (model beam), and with 100% and 200% camber. The experimental setup simulated the behavior of a two-span beam with fixed ends subjected to a central point load. The deflection under load was measured. Load tests were performed on the experimental beams with an applied force ranging from $F = 0$ to 200 N in increments of $\Delta F = 10\text{ N}$. Diagrams were constructed to show the relationship between the deflection of the model and cambered beams under various loading conditions. A zero-deflection beam effect was observed. To verify the experimental findings, the behavior of the tested beams was also analyzed analytically and numerically. Analytical modeling enabled the adjustment of the elastic modulus to account for the material structure produced by 3D printing. The results obtained from numerical simulations in the LIRA software package showed good agreement with both the experimental and analytical results. Visualization was performed using FUSION software, where colored diagrams illustrated the deflection distribution along the beam length and demonstrated the efficiency of cambered beams in reducing deflections with increasing constructional camber. The research contributes to the study of constructional camber effects. The objective of the study is to develop practical technologies for applying constructional camber in real-world construction. The feasibility of using 3D printing technology for full-scale modeling of structural elements in buildings was demonstrated. A correlation was noted between the mechanical properties of 3D printed structures and the printing mode and filament parameters.

Keywords: constructional camber, full-scale experiment, computer simulation, FDM 3D printing, model beam, coPET material, deflection distribution.

УДК 711.25

К. В. Соколенко

PhD, ст. викл., ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3334-7855>

Кафедра Будівництва, урбаністики та просторового планування

Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, вул. Іоанна Павла II, 17, м. Київ, Україна, 01042

Д. В. Швидкий

аспірант, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8369-271X>

Кафедра Будівництва, міського господарства та архітектури

Вінницький Національний Технічний Університет, Хмельницьке шосе 95, Вінниця, Україна, 21021

В. М. Соколенко*

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5073-2694>

Кафедра Будівництва, урбаністики та просторового планування

Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, вул. Іоанна Павла II, 17, м. Київ, Україна, 01042

М. О. Морозенко

аспірант, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9928-466X>

Кафедра Будівництва, урбаністики та просторового планування

Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, вул. Іоанна Павла II, 17, м. Київ, Україна, 01042

*автор-кореспондент, e-mail: 13wms13@ukr.net

Містобудівні завдання та принципи трансформації планувально-транспортного каркасу урбанізованих територій сходу України

Цитувати як:

Соколенко, К. В., Швидкий, Д. В., Соколенко, В. М., Морозенко, М. О. (2025). Містобудівні завдання та принципи трансформації планувально-транспортного каркасу урбанізованих територій сходу України. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 23, 331-343. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-29](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-29)

© 2025, Соколенко, К. В., Швидкий, Д. В., Соколенко, В. М., Морозенко, М. О.

Анотація. У статті проаналізовано принципи та завдання, пов'язані з трансформацією планувальної та транспортної структури урбанізованих територій сходу України в умовах післявоєнної відбудови. Структурними наслідками бойових дій є деіндустріалізація та деградація населених пунктів, що виникли внаслідок значного відтоку населення, руйнування інфраструктури та виснаження ресурсної бази. Досліджено вплив війни на зміни планувальної та транспортної структури урбанізованих територій Луганської області. Визначено ключові фактори, які впливатимуть на розвиток регіону, зокрема економічні, соціально-політичні, демографічні та екологічні.

Проведено аналіз транспортного каркасу Луганської та Донецької областей, роль якого є визначальною для відновлення регіону. Встановлено, що сучасні умови вимагають модернізації існуючих транспортних мереж, усунення

вузьких місць та адаптації системи до нових реалій. Обґрунтовано необхідність формування перспективних транспортних коридорів та реалізації стратегій на основі комплексних планів просторового розвитку громад. Визначальними факторами залишаються рельєф місцевості та умови формування прикордонного регіону з обмеженим транспортним сполученням зі сходом.

Пріоритетність заходів зі створення сталого міського розвитку базується на поєднанні безпеки, екологічності, транспортної доступності та зручності для населення громад. Особливий акцент зроблено на повторному використанні будівельних відходів у процесі будівництва доріг та інженерного облаштування, що сприятиме відновленню інфраструктури та створенню кластерів розвитку. У висновках підкреслюється необхідність системного підходу до відновлення регіону, починаючи з модернізації системи планування і транспорту та впровадження довгострокових стратегій розвитку. Значний потенціал регіону полягає в його планувальній і транспортній структурі, розвиненій транспортній інфраструктурі та наявності зручних промислових майданчиків. Раціональна стратегія відновлення регіону повинна починатися з розробки регіональних комплексних планів просторового розвитку. Особливу увагу слід приділити модернізації транспортної мережі з урахуванням фактичної та перспективної чисельності населення міст, стратегії відновлення містоутворюючих підприємств, схеми регіонального розвитку.

Ключові слова: місто, агломерація, реконструкція міської забудови, реконструкція територій, регіональна типологія, матеріали рециклінгу

Вступ

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Завершення війни сформує багато складних питань повоєнного відновлення. Фактори та умови, що впливатимуть на реалізацію тих чи інших варіантів розбудови будуть визначатися економічними, соціально-політичними, демографічними, екологічними чинниками [1]. Залежно від масштабу та характеру руйнувань, повоєнна відбудова міст передбачає базові напрямки реконструктивної діяльності – реконструкція житлових та громадських будинків, промислових територій, дорожньої мережі та транспортної інфраструктури, інженерних мереж та систем, ландшафту – оточуючого середовища [2]. Довгий час актуальними завданнями буде проблема управління відходами від руйнації міської забудови внаслідок війни. Матиме місце перетворення суцільних зон міської забудови. Узагальнений світовий досвід свідчить, що повоєнне відновлення не обмежується лише об'єктною реконструкцією. Внаслідок війни проходить перебудова соціально-економічної структури регіону [3, 4]. Тривалий конфлікт трансформує суспільство, механічне повернення до минулого стає неможливим. Формуються умов функціонування суспільства мирного часу на оновлених засадах. Для урбанізованих територій, як найбільш складних та масштабованих наслідки війни можуть мати надзвичайний характер [5, 6].

Європа має досвід відбудови міст зруйнованих війною який відноситься до періоду після Другої світової війни [7, 8]. З того часу змінились умови, форма та функція містобудівних систем. Останні десятиріччя масштабних бойових дій міста континенту не зазнавали, а отже досвіду відновлення як такого немає. У США відомі проблеми міст, що зіткнулися з промисловою кризою фазного переходу пов'язаного зі зміною індустріального укладу та втратою ресурсу. І навіть у розвиненій країні виник т. з. «ржавий пасок», з міст, що занепадають. Прикладом може слугувати місто Детройт – котре і сьогодні має приблизно 1/4 території, виведеної з використання. У СРСР була реалізована масштабна програма відбудови міст зруйнованих війною, проте цей досвід наразі важко приймати за основу, оскільки методи та рішення спиралися на модель командної, адміністративної економіки. В сучасних умовах він стає неприйнятним, оскільки головний інструментарій – примус, не використовується в ринкових умовах.

Мета і завдання дослідження. Дослідження впливу наслідків війни на зміни планувально-транспортного каркасу урбанізованих територій сходу України. Розробка базових принципів доцільної трансформації інженерної організації території Луганської області.

Матеріали та методи

Методологія, використана при підготовці статті, базується на багаторівневому міждисциплінарному підході, який враховує соціально-економічні та містобудівні виклики, спричинені військовими діями на сході України.

У дослідженні використано теоретичні та емпіричні методи системного та статистичного аналізу, аналітичних порівнянь, містобудівного аналізу, ретроспективний аналіз, нормативно-правовий аналіз діючого законодавства, використання геоінформаційних систем, та статистичних даних. У роботі розглянуто кількісний та якісний характер впливу руйнувань і спричинених ними соціально-демографічних та економічних наслідків, зміну містобудівних параметрів регіональних утворень. Інформаційну базу складають літературні та архівні джерела, картографічні матеріали.

У сфері функціонально-просторового планування було застосовано системний аналіз, спрямований на визначення зон впливу війни та оптимізацію територіальних структур. Особлива увага приділялася агломераціям, що розглядаються як єдині функціональні утворення. Соціально-економічний аналіз зосереджувався на демографічних змінах, спричинених війною.

Результати та обговорення

В Україні внаслідок бойових дій фіксується ситуація, коли агломерація Лисичанськ-Сєвєродонецьк-Рубіжне практично зникла (рис. 1) [9-11].

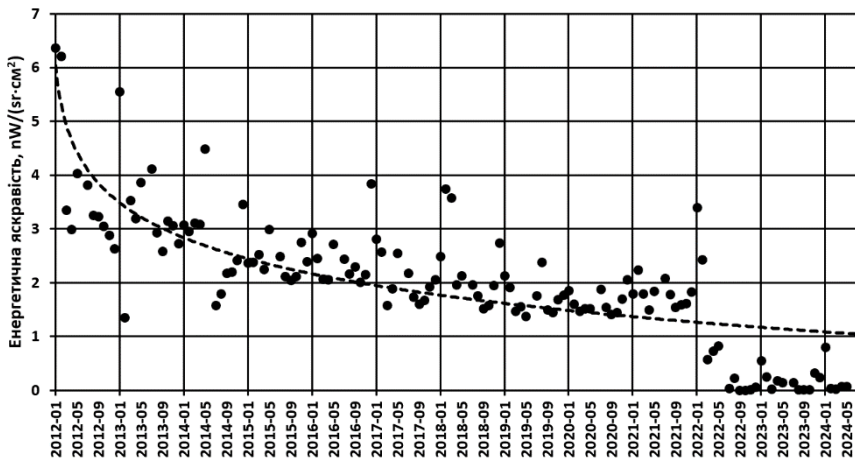


Рис. 1. Середня енергетична яскравість агломерації Лисичанськ-Сєвєродонецьк-Рубіжне у період 2012-2024 років

На сучасному етапі агломерація знаходиться під загрозою деіндустріалізації та деградації. Важко зробити прогноз стосовно варіантів розвитку та умов подальшого існування міст агломерації, але слід відзначити, що Попасна, Тошківка фактично зникли, і питання їх відбудови є під сумнівом [12].

Донбас знаходиться перед загрозою великої містобудівної кризи []. Людський ресурс втрачено. Урбанізовані території регіону зазнали масштабного відтоку населення та деградують, ресурсна база відновлення у традиційній парадигмі виснажена. На рисунку 2 представлено планувально-територіальний каркас Луганської та Донецької областей, котрий ілюструє щільність системи міського розселення. Окремі агломераційні поселення утворюють суцільні урбанізовані території. Надмірна щільність поселень становить нову проблему, пов'язану з забезпеченням їх існування та розвитку в умовах скорочення ресурсної бази, в першу чергу чисельності населення. Прогноз розвитку по групах населених місць може мати негативний сценарій: стагнація – криза - катастрофа. Враховуючи той факт, що сформувався новий прикордонний тип регіону – будуть формуватися також обмеження по видах діяльності та векторам розвитку. Щільність населення та кількості населених пунктів ймовірно буде зменшуватись. Постає питання оптимізації міжселенної системи регіону. Принципова

неможливість процесу урбанізації в зворотному напрямку спричинить наявність населених пунктів з кількістю населення кратно зменшеною від початку війни [13].

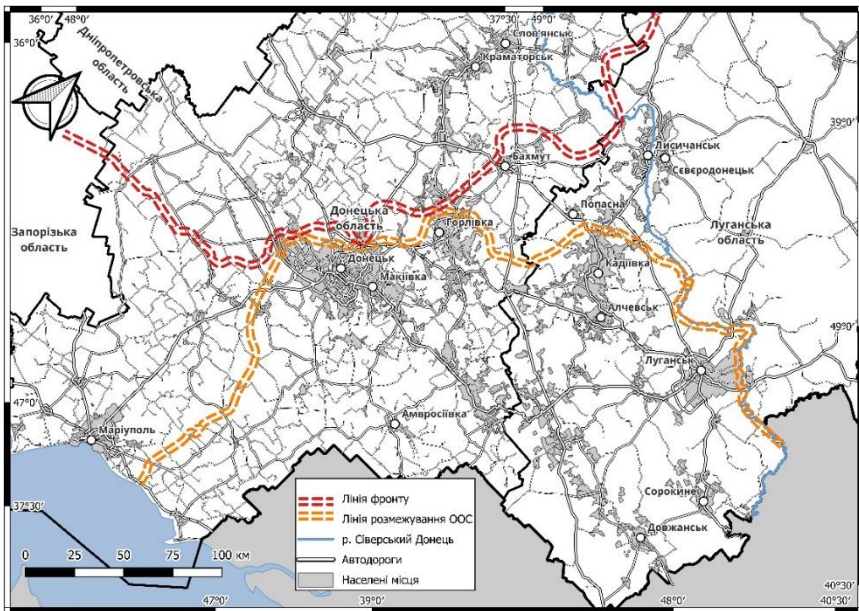


Рис. 2. Планувально-територіальний каркас Луганської та Донецької областей.

Стратегія сталого містобудівного регіонального розвитку вимагатиме визначення перспективних напрямків відновлення, визначення точок зростання у системі розселення. Існує загроза виникнення парадоксальної ситуації – щільність населення зменшується, проте формується дефіцит територій, придатних для активного використання. Містобудівний розвиток має горизонт планування на десятки років, отже на сучасному етапі постає завдання визначити базові фактори, чинники та принципи, що здатні забезпечити сталий розвиток регіону. Базовими принципами є: безпека, зручна транспортна доступність, наявність місць прикладання праці, зручне довкілля, екологічне середовище, освіта.

Історично рельєф місцевості визначає базові напрями формування зручного транспортного сполучення з населеними пунктами у системі розселення. В умовах багаторічного розвитку формується опорний планувально-транспортний каркас, структура якого є незмінною [5, 6].

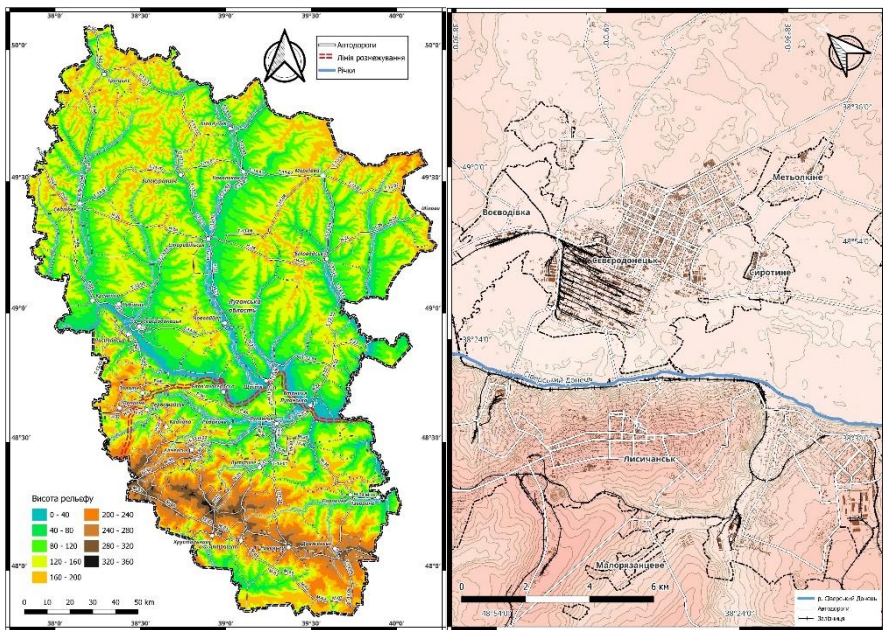


Рис. 3. Схема рельєфу Луганської області суміщена з головними транспортними напрямками. а – Луганська область, б – агломерація Лисичанськ-Северодонецьк-Рубіжне

В таких умовах ділянки промислових районів, зони що прилягають до транспортних коридорів мають набір перманентних якостей, значну первинну вартість. Це зумовлено зручністю розташування та низькими витратами на інженере упорядкування території ділянки. Ділянки промислових підприємств мають зручний рельєф (ухил), транспортне сполучення, наявність водного ресурсу (рис. 36). Тобто є можливість використання певних територій, планувальних одиниць інженерних систем з метою подальшого відновлення регіону. Комплексне завдання трансформації та відновлення системи розселення регіону на тривалу перспективу в першу чергу вимагатиме оновлення схеми транспортного сполучення у регіоні. Рішення, закладені у зміну векторів транспортного сполучення матимуть визначальний вплив на розвиток області протягом наступних десятиріч. Основні рішення стосовно трансформації територіальних утворень слід реалізовувати в рамках оновлених комплексних планів просторового розвитку території територіальної громади, генеральних планів населених пунктів [15, 16].

Схема основних транспортних коридорів Луганської області (рис. 3а) демонструє, що опорний транспортний каркас формувався під впливом двох головних груп факторів – рельєф та промисловість. В умовах

становлення промислового Донбасу на засадах ресурсної колонії, промисловість та робітничі поселення тяжіли до викопного ресурсу. Рельєф визначав максимально зручні маршрути сполучення в регіоні. Внутрішній характер регіону з часів царату зумовив його транспортне сполучення з головними промисловими центрами та транспортними вузлами. Вздовж русла річки Сіверський Донець сформувалася умовна вісь Бахмут-Луганськ з виходом на схід та захід. Для лівого берега характерні напрямки південь-північ вздовж річок. Правобережжя має широтну орієнтацію доріг що перетинають область. Формування прикордонного регіону матиме вплив на перерозподіл напрямку, характеру та масштабів перевезення всіх категорій – вантажів, транзиту, населення. Для області це означатиме коригування цільових орієнтирів розвитку транспортного каркасу. Рух у напрямку кордонів на сході буде блоковано. Завданням буде створення зручної мережі транспортного сполучення області в загальній схемі транспортних коридорів країни. Ці завдання виконуватимуться поетапно та стадійно. Загальними принципом є первинна модернізація існуючого планувального каркасу, адаптація його під оновлені вимоги. Наступним кроком є «розшивка» вузьких місць – елементів дорожньої інфраструктури, що обмежують пропускну здатність. У віддаленій перспективі можна очікувати на формування нових транспортних коридорів. Для північної частини області ключовим транспортним вузлом є агломерація Лисичанськ-Северодонецьк-Рубіжне.

На рисунку 4 показано, що зруйновано всі мости та мостові переходи на території агломерації Лисичанськ-Северодонецьк-Рубіжне. Транспортне сполучення агломерації розірвано. Відновлення регіону включатиме реалізацію транспортного сполучення, умовою якого є визначення основних фокусів тяжіння – по потоках пасажирського сполучення, вантажного транспортного сполучення, сполучення спеціального призначення – з урахуванням типу транспорту. Містобудівні обґрунтування необхідно готувати з урахуванням фактичної та перспективної кількості населення міст, стратегії відновлення містоутворюючих підприємств, схем регіонального розвитку.

Агломерація має 9 мостів та мостових переходів, заплавні мости, котрі потребують відбудови. Слід відзначити, що регіон дуже постраждав від бойових дій, обсяг відходів від зруйнованих об'єктів ще належить детально обрахувати. На першому етапі вже слід опрацьовувати програмні показники обсягу вторинних будівельних відходів, способи їх утилізації та використання [17]. Дорожнє будівництво, інженерне облаштування ділянок розбудови як споживач т. з. інертних матеріалів доцільно орієнтувати на їх максимальне використання [17,18]. Дорожнє будівництво, модернізація системи транспортного сполучення, одночасне вирішення задач вторинного використання відходів від зруйнованої забудови дає можливість створити один з кластерів розвитку в регіоні.

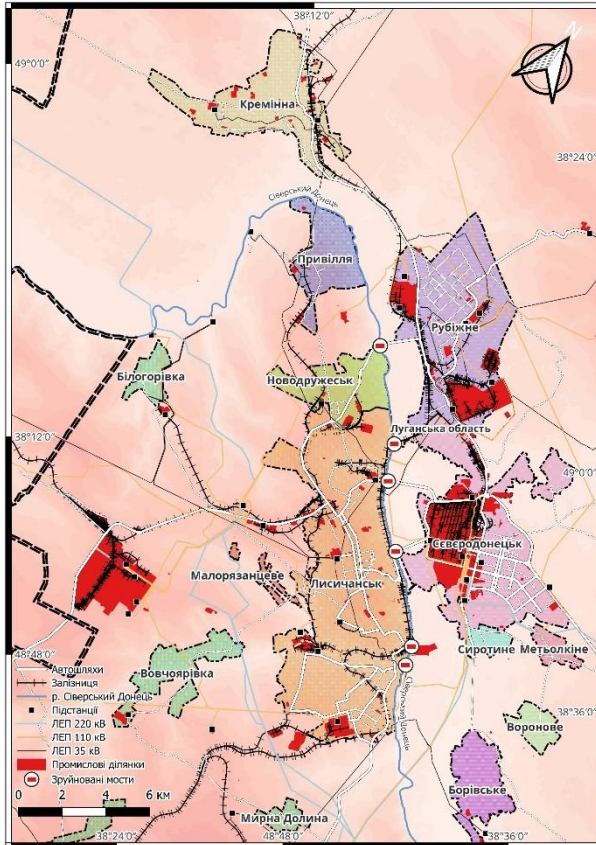


Рис. 4. Схема транспортного сполучення агломерації
Лисичанськ-Сєвєродонецьк-Рубіжне

Висновки

Ресурсний регіон – Донбас, основу індустрії котрого становила гірничо-металургійна промисловість, втратив свій ресурс внаслідок війни. Потенціал вугільної галузі вичерпано. Значні втрати спостерігаються по кількості та якості людського ресурсу. Для урбанізованого регіону це становить проблему. Зменшується кількість населення та щільність мережі поселень, це означає сповзання у кризу. Оскільки зворотна де урбанізація неможлива, ситуація може перетворити урбанізовані території у знелюднені ландшафти. Значний потенціал області становить її планувально-транспортний каркас, розвинена транспортна інфраструктура, наявність зручних промислових ділянок. Рациональну стратегію відновлення регіону

необхідно розпочинати з обласних комплексних планів просторового розвитку. Особливу увагу слід приділити модернізації транспортної мережі з урахуванням фактичної та перспективної кількості населення міст, стратегії відновлення містоутворюючих підприємств, схем регіонального розвитку.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

(Або вказати офіційні вихідні дані теми державної науково-дослідної роботи, гранту тощо)

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. Reconstructive Activity in the Context of Urban Life Cycle Phases. The Case of Ukrainian Cities / A. Pleshkanovska et al. *ACE: Architecture, City and Environment*. 2024. Vol. 18, no. 54. URL: <https://doi.org/10.5821/ace.18.54.12127>
2. Pleshkanovska A., Holyk J., Vantyukh D. Regional specificity of the transformation of settlements in the face of the challenges of war. *Spatial development*. 2024. No. 8. P. 348–360. URL: <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2024.8.348-360>
3. Sokolenko K., Sokolenko V., Filatiev M., Chernih O. The influence of socio-demographic and external factors on the change of urban parameters of the Luhansk region. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 1049, no. 1. P. 012079. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1049/1/012079>
4. Sokolenko K. V. Sub'jektivist' jak faktor vidnovlennja deokupovanyh terytorij. *Visnyk Nacional'nogo universytetu vodnogo gospodarstva ta pryrodokorystuvannja*. 2023. T. 3, № 103. S. 149–161. URL: <https://doi.org/10.31713/vt3202314>
5. Bilokon' Ju. M. Regional'ne planuvannja. (Teorija i praktyka) / red. I. O. Fomin. Kyi'v : Logos, 2003. 259 s.
6. Bilokon' Ju. M. Funkcija ta struktura formy v regional'nomu planuvanni. – K.: Kyj, 2002. – 98 s. / red. I. Fomin. Kyi'v : Kyj, 2002. 98 s.

7. The World Bank's Experience with Post-Conflict Reconstruction» - The World Bank / A. Kreimer et al. Washington, D.C : The World Bank, 1998. 112 p. URL: <https://ieg.worldbankgroup.org/sites/default/files/Data/reports/postcon.pdf>.
8. The World Bank. Post-Conflict Reconstruction. The role of the World Bank. Washington, D.C. : The World Bank, 1998. 80 p. URL: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/175771468198561613/pdf/multi-page.pdf>.
9. A mapping application that displays light pollution. Light pollution map. URL: <https://www.lightpollutionmap.info/>
10. A software for selecting regions of Earth and examining the trend in light emissions observed by satellite. Radiance light trends. URL: <https://lighttrends.lightpollutionmap.info/>
11. Звіт про прямі збитки інфраструктури від руйнувань внаслідок військової агресії Росії проти України станом на початок 2024 року. Київ : KSE Institute, 2024. 39 с. URL: https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/05/Eng_01.01.24_Damages_Report.pdf
12. Sokolenko K., Sokolenko V., Holodnov O., Chernih O. Town-planning tasks and principles of restoration of urbanized territories of the Luhansk region, destroyed as a result of hostilities. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023. Vol. 1254, no. 1. P. 012078. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012078>
13. Sokolenko K. V., Sokolenko V. M. Zvorotna reurbanizacija Donbasu. Mzhlyvist' ta perspektyvy. Visnyk Nacional'nogo universytetu vodnogo gospodarstva ta pryrodokorystuvannya. 2024. T. 3, № 107. S. 70–81. URL: <https://doi.org/10.31713/vt320248>.
15. Djuzhev C. A. General'ne strategichne mistobudivne planuvannya ta problemy planuval'nogo upravlinnja rozselelennjam (chastyna druga: problemy, pereshkody shhodo i'h rozv'jazannya, aktual'ni zavdannja ta tehnologichni vymogy do zmistu mistobudivnoi' dokumentacii'). *Mistobuduvannya ta terytorial'ne planuvannya*. 2023. № 84. S. 64–131. URL: <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2023.84.64-131>.
16. Djuzhev C. A. General'ne strategichne mistobudivne planuvannya ta problemy planuval'nogo upravlinnja rozselelennjam (chastyna persha: jak podolaty teoretyko-metodologichnu i projektuval'no-metodychnu kryzu). *Mistobuduvannya ta terytorial'ne planuvannya*. № 82, S. 129–184. URL: <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2023.82.129-184>.
17. Savyc'kyj M., Smyrnov A. Vlastyvosti vtorynnnyh krupnyh zapovnjuvachiv, otrymanyh v rezul'tati podribnennja betonnyh vidhodiv. *Budivel'ni konstrukcii*. Teorija i praktyka, (14), 2024, S. 19-28. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.14.2024.19-28>.
18. Savyc'kyj M. V., Smyrnov A. S. Osoblyvosti vykorystannja podribnenoogo betonnoogo bruhtu v yakosti krupnogo zapovnjuvacha dlja betonu. *Ukrai'ns'kyj zhurnal budivnytstva ta arhitektury*, № 6 (018), 2023. S. 111-117.

Література

1. Reconstructive Activity in the Context of Urban Life Cycle Phases. The Case of Ukrainian Cities / A. Pleshkanovska et al. *ACE: Architecture, City and Environment*. 2024. Vol. 18, no. 54. URL: <https://doi.org/10.5821/ace.18.54.12127>
2. Pleshkanovska A., Holyk J., Vantyukh D. Regional specificity of the transformation of settlements in the face of the challenges of war. *Spatial development*. 2024. No. 8. P. 348–360. URL: <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2024.8.348-360>
3. Sokolenko K., Sokolenko V., Filatiev M., Chernih O. The influence of socio-demographic and external factors on the change of urban parameters of the Luhansk region. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 1049, no. 1. P. 012079. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1049/1/012079>
4. Соколенко К. В. Суб'єктність як фактор відновлення деокупованих територій. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування*. 2023. Т. 3, № 103. С. 149–161. URL: <https://doi.org/10.31713/vt3202314>
5. Білоконь Ю. М. Регіональне планування. (Теорія і практика) / ред. І. О. Фомін. Київ : Логос, 2003. 259 с.
6. Білоконь Ю. М. Функція та структура форми в регіональному плануванні. – К.: Кий, 2002. – 98 с. / ред. І. Фомін. Київ : Кий, 2002. 98 с.
7. The World Bank's Experience with Post-Conflict Reconstruction» - The World Bank / A. Kreimer et al. Washington, D.C : The World Bank, 1998. 112 p. URL: <https://ieg.worldbankgroup.org/sites/default/files/Data/reports/postcon.pdf>.
8. The World Bank. Post-Conflict Reconstruction. The role of the World Bank. Washington, D.C. : The World Bank, 1998. 80 p. URL: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/175771468198561613/pdf/multi-page.pdf>.
9. A mapping application that displays light pollution. Light pollution map. URL: <https://www.lightpollutionmap.info/>
10. A software for selecting regions of Earth and examining the trend in light emissions observed by satellite. Radiance light trends. URL: <https://lighttrends.lightpollutionmap.info/>
11. Звіт про прямі збитки інфраструктури від руйнувань внаслідок військової агресії Росії проти України станом на початок 2024 року. Київ : KSE Institute, 2024. 39 с. URL: https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/05/Eng_01.01.24_Damages_Report.pdf
12. Sokolenko K., Sokolenko V., Holodnov O., Chernih O. Town-planning tasks and principles of restoration of urbanized territories of the Luhansk region, destroyed as a result of hostilities. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023. Vol. 1254, no. 1. P. 012078. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012078>
13. Соколенко К. В., Соколенко В. М. Зворотна реурбанізація Донбасу. Можливість та перспективи. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування*. 2024. Т. 3, № 107. С. 70–81. URL: <https://doi.org/10.31713/vt320248>.

15. Дюжев С. А. Генеральне стратегічне містобудівне планування та проблеми планувального управління розселенням (частина друга: проблеми, перешкоди щодо їх розв'язання, актуальні завдання та технологічні вимоги до змісту містобудівної документації). Містобудування та територіальне планування. 2023. № 84. С. 64-131. URL: <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2023.84.64-131>.

16. Дюжев С. А. Генеральне стратегічне містобудівне планування та проблеми планувального управління розселенням (частина перша: як подолати теоретико-методологічну і проєктуально-методичну кризу). Містобудування та територіальне планування. № 82, С. 129-184. URL: <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2023.82.129-184>.

17. Савицький М., Смирнов А. Властивості вторинних крупних заповнювачів, отриманих в результаті подрібнення бетонних відходів. Будівельні конструкції. Теорія і практика, (14), 2024, С. 19-28. URL: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.14.2024.19-28>.

18. Савицький М. В., Смирнов А. С. Особливості використання подрібненого бетонного брухту в якості крупного заповнювача для бетону. Український журнал будівництва та архітектури, № 6 (018), 2023. С. 111-117.

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 27.05.2025	Received 27.05.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 28.05.2025	Received in revised form 28.05.2025
Прийнято 01.06.2025	Accepted 01.06.2025
Опубліковано 25.06.2025	Published 25.06.2025

K. V. Sokolenko

Ph.D, Senior Lecturer, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3334-7855>

Department Of Civil Engineering, Urbanism and Spatial Planning

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 17 John Paul II Str., Kyiv, Ukraine, 01042

D. V. Shvydkyi

Postgraduate student, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8369-271X>

Department of Construction, Urban Planning and Architecture

Vinnitsia National Technical University, 95 Khmelnytske Shosse, Vinnitsia, Ukraine, 21021

V. M. Sokolenko*

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5073-2694>

Department Of Civil Engineering, Urbanism and Spatial Planning

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 17 John Paul II Str., Kyiv, Ukraine, 01042

M. O. Morozenko

Postgraduate student, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9928-466X>

Department Of Civil Engineering, Urbanism and Spatial Planning

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 17 John Paul II Str., Kyiv, Ukraine, 01042

*corresponding author, e-mail: 13wms13@ukr.net

Urban planning tasks and principles of transformation of the planning and transport framework of urbanized territories of eastern Ukraine

How to Cite:

Sokolenko, K.V., Shvydkyi, D.V., Sokolenko, V.M., Morozenko, M.O. (2025). Urban planning tasks and principles of transformation of the planning and transport framework of urbanized territories of eastern Ukraine. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 23, 331-343. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-29](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-29)

Abstract. The article analyzes the principles and tasks related to the transformation of the planning and transport framework of urbanized areas of eastern Ukraine in the context of post-war recovery. The structural consequences of the hostilities are deindustrialization and degradation of settlements, which arose due to a significant outflow of population, destruction of infrastructure and exhaustion of the resource base. The impact of the war on changes in the planning and transport framework of urbanized areas of Luhansk region is investigated. The key factors that will influence the development of the region, including economic, socio-political, demographic and environmental factors, are identified.

An analysis of the transport framework of the Luhansk and Donetsk regions, whose role is crucial for the recovery of the region, is carried out. It is established that current conditions require modernization of existing transport networks, elimination of bottlenecks and adaptation of the system to new realities. The necessity of forming promising transport corridors and implementing strategies based on comprehensive plans for the spatial development of communities is substantiated. The determining factors remain the terrain and the conditions for the formation of a border region with limited transport links to the east.

Prioritization of measures to create sustainable urban development is based on a combination of safety, environmental friendliness, transport accessibility and convenience for the population of communities. Particular emphasis is placed on the reuse of construction waste in the process of road construction and engineering arrangement, which will contribute to the restoration of infrastructure and the creation of development clusters. The conclusions emphasize the need for a systematic approach to the region's recovery, starting with the modernization of the planning and transport framework and the implementation of long-term development strategies. The region's significant potential lies in its planning and transportation framework, developed transport infrastructure, and the availability of convenient industrial sites. A rational strategy for the region's recovery should begin with regional comprehensive spatial development plans. Particular attention should be paid to the modernization of the transport network, taking into account the actual and prospective population of cities, the strategy for the restoration of city-forming enterprises, and regional development schemes.

Keywords: city, agglomeration, reconstruction of urban development, reconstruction of territories, regional typology, recycling materials

УДК 711

В. О. Степанюк

студентка,

Кафедра будівництва та цивільної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

М. В. Смаль*

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3333-0984>

Кафедра будівництва та цивільної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

О. В. Дзюбинська

к.е.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1478-8452>

Кафедра будівництва та цивільної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

А. В. Дзюбинський

к.е.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5156-9852>

Кафедра товарознавства та експертизи в митній справі

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

О. В. Смаль

викладач,

Технічний фаховий коледж ЛНТУ, вул. Конякіна, 5, Луцьк, Україна, 43023

*автор-кореспондент, e-mail: smal.masha2017@mail.com

Дослідження дорожньо-транспортної мережі міста Луцька

Цитувати як:

Степанюк, В.О., Смаль, М.В., Дзюбинська, О.В., Дзюбинський, А.В., Смаль, О.В. (2025). Дослідження дорожньо-транспортної мережі міста Луцька. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 23. 344-352. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-30](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-30)

© 2025, Степанюк В.О., Смаль М.В., Дзюбинська О.В., Дзюбинський А.В., Смаль О.В.

Анотація. У цій статті представлено комплексний SWOT-аналіз дорожньо-транспортної мережі Луцька, метою якого є оцінка її поточного стану, сильних та слабких сторін, можливостей та загроз. Оцінюючи ключові елементи інфраструктури, схеми руху транспорту, дослідження надає цінну інформацію про потенціал розвитку, ефективні плани модернізації та проблеми транспортної системи міста, розставивши пріоритети в ремонтах та залученні додаткових ресурсів для її покращення.

Аналіз визначає кілька сильних сторін, зокрема компактне міське планування Луцька, добре сполучену дорожню систему та зусилля з модернізації інфраструктури. Ці аспекти сприяють відносно ефективній мобільності та доступності в межах міста. Однак, такі слабкі сторони, як старіння дорожніх покриттів, затори в години пік, недостатня кількість паркувальних місць та відсутність передових технологій управління дорожнім рухом, перешкоджають оптимальному транспортному потоку.

Щодо можливостей, у статті висвітлюються потенційні інвестиції в розумні транспортні рішення, розширення велосипедної інфраструктури та

розвиток екологічно чистих альтернатив громадському транспорту. Крім того, збільшення фінансування з державних та міжнародних джерел може сприяти покращенню дорожніх умов та послуг мобільності.

У дослідженні також розглядаються зовнішні загрози, зокрема зростання кількості транспортних засобів, що призводить до більших заторів, екологічні проблеми, пов'язані з міськими викидами, та економічні обмеження, що обмежують розширення інфраструктури. Вирішення цих проблем вимагає стратегічного планування, політичних втручань та співпраці зацікавлених сторін.

Інтегруючи результати SWOT-аналізу, це дослідження надає рекомендації щодо покращення дорожньо-транспортної мережі Луцька, забезпечуючи більш ефективну, стійку та готову до майбутнього систему мобільності як для мешканців, так і для відвідувачів.

Ключові слова: SWOT-аналіз, дорожньо-транспортна мережа міста Луцьк.

Вступ

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Сучасний розвиток міських територій значною мірою залежить від ефективності їхньої дорожньо-транспортної мережі. У Луцьку, як і в багатьох інших містах, транспортна інфраструктура відіграє ключову роль у забезпеченні мобільності населення, економічного зростання та екологічної стабільності. Однак, зростаюче навантаження на дороги, обмеженість фінансових ресурсів та необхідність впровадження сучасних технологій вимагають ретельного аналізу існуючої ситуації.

Мета і завдання дослідження. Метою даного дослідження є проведення аналізу дорожньо-транспортної мережі Луцька, щоб визначити її сильні й слабкі сторони, можливості й загрози зростання.

Матеріали та методи

Для зручності проведення даного дослідження було обрано метод SWOT-аналізу. Цей метод може бути корисним для оцінки дорожньої інфраструктури, допомагаючи визначити ключові аспекти її розвитку та потенційні проблеми.

SWOT-аналіз – це метод стратегічного аналізу, який допомагає оцінити внутрішні та зовнішні фактори, що впливають на об'єкт дослідження) [1]. Його основна мета – визначити сильні та слабкі сторони (внутрішні чинники), а також можливості та загрози (зовнішні чинники) (рис.1).

SWOT-аналіз допомагає не лише оцінити поточний стан дорожньо-транспортної мережі, але й визначити стратегічні напрямки для її покращення. На основі результатів аналізу можна розробити ефективні плани модернізації інфраструктури, розставити пріоритети в ремонтах та залучати додаткові ресурси для покращення транспортної ситуації в місті.



Рис. 1. Принципи проведення SWOT-аналізу

Результати та обговорення

Вулиці та дороги є важливим аспектом міської інфраструктури, що впливає на комфорт, безпеку та швидкість пересування мешканців та гостей міста. Луцьк, як один із обласних центрів України, має розвинену транспортну систему, проте стикається з низкою проблем, які потребують вирішення.

Для дорожньої мережі Луцька притаманна вільна планувальна схема. Через територію міста прокладено автомобільний шлях міжнародного значення М-19, що також є частиною Європейського автомобільного маршруту Е-85. Крім цього місто пронизано рядом автошляхів національного та регіонального значення (Н-22, Н-17, Р-14) (рис.2).

У Луцьку утриманням та обслуговуванням дорожньо-транспортної мережі займаються кілька організацій та установ [3]:

1. Департамент житлово-комунального господарства Луцької міської ради відповідає за утримання та ремонт об'єктів благоустрою вулично-дорожньої мережі міста.

2. Управління транспорту та зв'язку Луцької міської ради забезпечує організацію роботи пасажирського транспорту, розвиток ринку транспортних послуг та контроль за виконанням правил перевезення пасажирів і вантажів.

3. Комунальне підприємство «АвтоПаркСервіс» відповідає за організацію та утримання мережі стоянок таксі та паркувальних майданчиків у місті.

4. Служба автомобільних доріг у Волинській області здійснює утримання та ремонт автомобільних доріг державного значення, що проходять через Луцьк, включаючи мостові та лінійні споруди.

5. Департамент муніципальної варті Луцької міської ради контролює дотримання правил благоустрою, включаючи утримання в належному стані проїзної частини автомобільних доріг та тротуарів.

6. Контакт-центр «Комфортне місто» приймає звернення щодо питань благоустрою та інфраструктури міста.

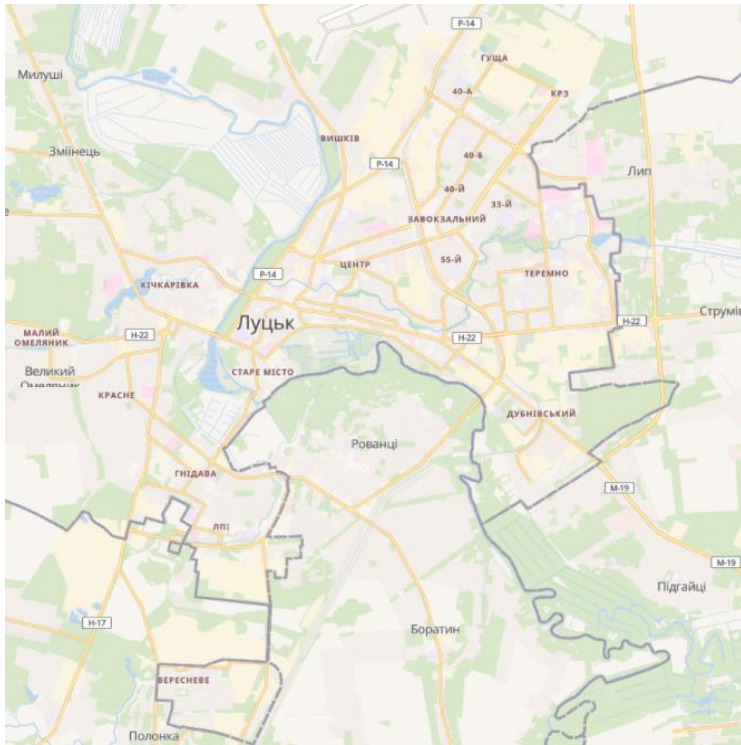


Рис. 2. Схема дорожньої мережі Луцька. Open Street Map [2]

За останнє десятиліття в Луцьку активно вдосконалюють дорожньо-транспортну мережу: проводяться поточні та капітальні ремонти вулиць та доріг, виконується нова розмітка, переглядається організація дорожнього руху, виконується оновлення благоустрою тротуарів, розвивається вело інфраструктура, збільшується кількість парковок та оновлюється громадський транспорт [4]-[6]. Це формує сильні сторони дорожньо-транспортної мережі Луцька.

Попри позитивні зміни в структурі доріг та транспорту Луцька, залишається багато невирішених проблем. Серед них затори через перевантаженість вулиць, погана якість дорожнього покриття і його швидка зношуваність, недостатня кількість паркомісць (особливо в центральній частині міста), застарілий громадський транспорт та його нерегулярність на менш популярних маршрутах, часті ДТП через неправильну організацію дорожнього руху [7], [8]. Всі вище перераховані чинники формують слабкі сторони дорожньо-транспортної мережі міста.

Таблиця 1. SWOT-аналіз дорожньо-транспортної мережі Луцька

S	СИЛЬНІ СТОРОНИ	- компактність міста - наявність об'їзних доріг - регулювання руху світлофорами - розвинена мережа громадського транспорту - розвиток вело інфраструктури - наявність пішохідних зон
W	СЛАБКІ СТОРОНИ	- перевантаженість центральних вулиць - зношене дорожнє покриття - недостатня кількість паркомісць - проблеми з громадським транспортом - недостатня кількість розв'язок
O	МОЖЛИВОСТІ	- залучення іноземних інвестицій - оптимізація схем руху та влаштування розв'язок - створення нових паркомісць за рахунок будівництва підземних паркінгів - покращення якості та довговічності дорожнього покриття - впровадження сучасних системи моніторингу руху - модернізація громадського транспорту
T	РИЗИКИ	- брак фінансування - стрімке збільшення індивідуальних транспортних засобів - ускладнення руху внаслідок ремонтних робіт - щільна забудова центральної частини міста

Система міського громадського транспорту слугує головним засобом мобільності населення, яким щодня користується понад 100 тисяч пасажирів, основне навантаження припадає на тролейбуси та маршрутні таксі. У 2021 році громадським транспортом міста перевезено 32 898 741 пасажирів, а в 2024 році було перевезено 40 млн 304 тисяч пасажирів [9]. З огляду на це надзвичайно важливо працювати над удосконаленням системи транспорту міста та розв'язанням супутніх проблем.

Підсумовуючи все вищесказане, формуємо таблицю 1 «SWOT-аналіз дорожньо-транспортної мережі Луцька».

Висновки

SWOT-аналіз дорожньо-транспортної мережі Луцька дав змогу оцінити її поточний стан, виявити сильні й слабкі сторони, а також визначити можливості розвитку та загрози.

До сильних сторін належать розвинена дорожня інфраструктура, наявність магістральних вулиць, активне використання громадського транспорту та сприятливе географічне розташування міста. Водночас серед слабких сторін виділяються зношеність покриття, нестача паркувальних місць, затори в центрі та нерівномірний розвиток громадського транспорту.

Серед можливостей – впровадження «розумного» транспорту, розвиток електротранспорту, удосконалення маршрутної мережі та залучення інвестицій. Проте існують і загрози, зокрема зростання кількості автомобілів без належного розширення доріг, екологічні проблеми та обмежене фінансування інфраструктурних проєктів.

Отже, необхідно модернізувати транспортну систему Луцька, вдосконалювати інфраструктуру, підвищувати безпеку руху та впроваджувати екологічні транспортні рішення. Це сприятиме створенню комфортного та ефективного транспортного середовища для міста.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1.UDC. SWOT- analysis [Digital source] .– Access: <https://ukrainiandigital.com/swot-analiz/>

2. Official website of the Lutsk City Council. Open Street Map [Digital source] .– Access:
Access: <https://geo.lutskrada.gov.ua/ua/map/mbk#/11:25.348904,50.751783:0.00:0.00?baseLayer=graymap&layers=osmb>
3. Official website of the Lutsk City Council. Department of Transport [Digital source] .– Access: <https://www.lutskrada.gov.ua/departments/upravlinnia-transportu-ta-zv-iazku>
4. Volyn news. European, inclusive and convenient: renovation of Volya Avenue in Lutsk is being completed [Digital source] .– Access: <https://www.volynnews.com/news/all/yevropeyskyy-inkliuzyvnyy-ta-zruchnyy-u-lutsku-zavershuiut-remontuvaty-prospekt-voli/>
5. Volyn news. New parking spaces, bike paths and sidewalks: Lutsk is working to improve traffic management [Digital source] .– Access: <https://www.volynnews.com/news/all/oblashtuvannia-trotuariv-novykh-parkomists-ta-velodorizhok-u-lutsku-pra/>
6. Passenger transport. Lutsk urban transport 2024: how it works [Digital source] .– Access: <https://traffic.od.ua/blogs/alexvelm/1257845>
7. Public Lutsk. Patrol officers named the most dangerous road sections in Volyn [Digital source] .– Access: <https://suspilne.media/lutsk/812763-patrulni-nazvali-najbils-avarijni-dilanki-dorig-na-volini/>
8. Competitor. Traffic jams in Lutsk: how to solve the problem [Digital source] .– Access: <https://konkurent.ua/publication/136408/zatori-u-lutsku-yak-rozvyazati-problemu/>
9. Official website of the Lutsk City Council. City transport [Digital source] .– Access: https://www.lutskrada.gov.ua/pages/transport-mista?utm_source=chatgpt.com

Література

1. UDC. SWOT-аналіз [Електронний ресурс] .– Режим доступу: <https://ukrainiandigital.com/swot-analiz/>
2. Офіційний сайт Луцької міської ради. Open Street Map [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://geo.lutskrada.gov.ua/ua/map/mbk#/11:25.348904,50.751783:0.00:0.00?baseLayer=graymap&layers=osmb>
3. Офіційний сайт Луцької міської ради. Відділ транспорту [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.lutskrada.gov.ua/departments/upravlinnia-transportu-ta-zv-iazku>
4. Волинські новини. Європейський, інклюзивний та зручний: у Луцьку завершують ремонтувати проспект Волі [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.volynnews.com/news/all/yevropeyskyy-inkliuzyvnyy-ta-zruchnyy-u-lutsku-zavershuiut-remontuvaty-prospekt-voli/>
5. Волинські новини. Нові паркомісця, велодоріжки та тротуари: у Луцьку працюють над покращенням організації дорожнього руху [Електронний ресурс]. –

Режим доступу: <https://www.volynnews.com/news/all/oblashtuvannia-trotuariv-novykh-parkomists-ta-velodorizhok-u-lutsku-pra/>

6.Пасажирський транспорт. Міський транспорт Луцька 2024: як це працює [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://traffic.od.ua/blogs/alexvelm/1257845>

7.Суспільне Луцьк. Патрульні назвали найбільш аварійні ділянки доріг на Волині [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://suspilne.media/lutsk/812763-patruni-nazvali-najbils-avarijni-dilanki-dorig-na-volini/>

8.Конкурент. Затори у Луцьку: як розв'язати проблему [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://konkurent.ua/publication/136408/zatori-u-lutsku-yak-rozvyazati-problemu/>

9.Офіційний сайт Луцької міської ради. Транспорт міста [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.lutskrada.gov.ua/pages/transport-mista?utm_source=chatgpt.com

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 28.05.2025	Received 28.05.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 29.05.2025	Received in revised form 29.05.2025
Прийнято 01.06.2025	Accepted 01.06.2025
Опубліковано 25.06.2025	Published 25.06.2025

V. O. Stepaniuk

student,

Department of Construction and Civil Engineering

Lutsk National Technical University, ul. Lvivska, 75, Lutsk, Ukraine, 43018

M.V. Smal*

Ph.D., Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-333-0984>

Department of Construction and Civil Engineering

Lutsk National Technical University, ul. Lvivska, 75, Lutsk, Ukraine, 43018

O.V. Dziubynska

Ph.D., Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1478-8452>

Department of Construction and Civil Engineering

Lutsk National Technical University, ul. Lvivska, 75, Lutsk, Ukraine, 43018

A.V. Dziubynskyi

Ph.D., Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5156-9852>

Department of Commodity Studies and Expertise in Customs

Lutsk National Technical University, ul. Lvivska, 75, Lutsk, Ukraine, 43018

O.V. Smal

teacher,

Technical Professional College of LNTU, vul. Konyakina, 5, Lutsk, Ukraine, 43023

*corresponding author, e-mail: smal.masha2017@mail.com

Research of the road and transport network of the city of Lutsk

How to Cite:

Stepaniuk V. O., Smal M.V., Dziubynska O.V., Dziubynskyi A.V., Smal O.V. (2025). Research of the road and transport network of the city of Lutsk. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 23, 344-352. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-30](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-30)

Abstract. This article presents a comprehensive SWOT analysis of Lutsk's road and transport network, aiming to assess its current state, strengths, weaknesses, opportunities, and threats. By evaluating key infrastructure elements, traffic patterns, and policy frameworks, the study provides valuable insights into the development potential and challenges of the city's transportation system.

The analysis identifies several strengths, including Lutsk's compact urban layout, a well-connected road system, and recent infrastructure modernization efforts. These aspects contribute to relatively efficient intra-city mobility and accessibility. However, weaknesses such as aging road surfaces, traffic congestion in peak hours, insufficient parking spaces, and a lack of advanced traffic management technologies hinder optimal transport flow.

In terms of opportunities, the article highlights potential investment in smart traffic solutions, expansion of cycling infrastructure, and the development of eco-friendly public transport alternatives. Additionally, increased funding from state and international sources could accelerate the improvement of road conditions and mobility services.

The study also examines external threats, including rising vehicle numbers leading to greater congestion, environmental concerns linked to urban emissions, and economic constraints limiting infrastructure expansion. Addressing these challenges requires strategic planning, policy interventions, and stakeholder cooperation.

By integrating SWOT analysis findings, this research provides recommendations for enhancing Lutsk's road and transport network, ensuring a more efficient, sustainable, and future-ready mobility system for residents and visitors alike.

Keywords: SWOT analysis, the road and transport network of Lutsk.

УДК 528.8+711.4

А.В. Уль

д.т.н., професор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5249-0828>

Кафедра геодезії, землепорядкування та кадастру

Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі, 13, Луцьк, Україна, 43025

О.В. Мельник

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5429-4038>

Кафедра геодезії, землепорядкування та кадастру

Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі, 13, Луцьк, Україна, 43025

Ю.А. Мельник*

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5186-7032>

Кафедра будівництва та цивільної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

Л.А. Вакулюк

Старший викладач, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1087-3927>

Кафедра геодезії, землепорядкування та кадастру

Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі, 13, Луцьк, Україна, 43025

*автор-кореспондент, e-mail: y.melnyk@lntu.edu.ua

Взаємозв'язок між температурою земної поверхні та характеристиками земного покриття міста Луцьк: аналіз часових рядів супутникових індексів Landsat.

Цитувати як:

Уль, А.В., Мельник, О. В., Мельник, Ю. А., Вакулюк, Л. А. (2025). Взаємозв'язок між температурою земної поверхні та характеристиками земного покриття міста Луцьк: аналіз часових рядів супутникових індексів Landsat. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 23, 353-369. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-31](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-31)

© 2025, Уль, А.В., Мельник, О. В., Мельник, Ю. А., Вакулюк, Л. А.

Анотація. Швидке зростання міського населення посилює ефект "острову тепла" (UHI), що має значний вплив на довкілля та здоров'я. Розуміння динаміки температури земної поверхні (LST) та її зв'язку з типами земного покриття є критично важливим для сталого міського розвитку. Дистанційне зондування Землі є цінним інструментом для моніторингу та дослідження температурного режиму міських територій, дозволяючи отримувати інформацію про LST на великих територіях з високою просторовою та часовою роздільною здатністю. На відміну від традиційних метеорологічних станцій, супутники забезпечують синоптичний огляд території, що є вирішальним для вивчення просторових закономірностей UHI. Особливо важливими є дані супутників програми Landsat, які надають довгострокові архівні записи з 1980-х років та мають термальні канали, придатні для розрахунку LST, а також канали у видимому, ближньому інфрачервоному та короткохвильовому інфрачервоному діапазонах для вивчення характеристик земного покриття. Дане дослідження присвячене аналізу довготривалої динаміки річних середніх значень LST та спектральних індексів NDVI та NDBI для міста

Луцьк за період 1984-2024 років з використанням даних супутників Landsat (5, 7, 8, 9) та платформи Google Earth Engine. Застосовано методи аналізу часових рядів, лінійного трендового та кореляційного аналізу. Виявлено значні річні коливання LST та загальну тенденцію до її зростання ($+0.17^{\circ}\text{C}/\text{рік}$). Спостерігається позитивний тренд NDVI та негативний тренд альбедо. Кореляційний аналіз показав очікувані сильні негативні зв'язки LST з Альбедо. Однак, виявлені неочікувані позитивні кореляції LST з вегетаційними індексами та слабкі зв'язки з індексами забудови/голої землі потребують подальшого дослідження просторових закономірностей. Результати дослідження мають значення для оцінки мікроклімату та підтримки рішень з міського планування.

Ключові слова: температура земної поверхні, спектральні індекси, часові ряди, кореляція, Landsat, Google Earth Engine.

Вступ

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Швидке зростання міського населення по всьому світу призводить до значної трансформації ландшафтів, замінюючи природні поверхні (рослинність, ґрунти, водойми) на штучні матеріали (асфальт, бетон, будівлі). Ці зміни мають глибокий вплив на місцевий клімат, зокрема, сприяючи формуванню та посиленню ефекту міського "острову тепла" (Urban Heat Island - UHI) [1]. Ефект UHI проявляється у підвищенні температури повітря та земної поверхні в межах міських територій порівняно з навколишніми природними або сільськогосподарськими ландшафтами.

Дослідження температурного режиму міських територій має критичне значення з кількох причин [2]. По-перше, підвищені температури в містах можуть мати негативний вплив на здоров'я населення, збільшуючи ризики теплових ударів, загострення серцево-судинних та респіраторних захворювань. По-друге, UHI призводить до зростання споживання енергії на кондиціонування повітря, збільшуючи навантаження на електромережі та викиди парникових газів. По-третє, зміна термального режиму впливає на екосистеми в межах міста та прилеглих територій, змінюючи умови для існування флори і фауни. Розуміння динаміки та просторового розподілу температур є необхідним для розробки ефективних стратегій міського планування, адаптації до зміни клімату та покращення якості життя мешканців.

Дистанційне зондування Землі є надзвичайно цінним інструментом для моніторингу та дослідження температурного режиму міських територій. Супутникові дані дозволяють отримувати інформацію про температуру земної поверхні (Land Surface Temperature - LST) на великих територіях з високою просторовою та часовою роздільною здатністю [3, 4]. На відміну від традиційних метеорологічних станцій, які надають точкові вимірювання температури повітря, супутники забезпечують синаптичний огляд територій, що є вирішальним для вивчення просторових закономірностей

УНІ. Особливо важливими є дані супутників програми Landsat, які надають довготривалі архівні записи (починаючи з 1980-х років) та мають термальні канали, придатні для розрахунку LST, а також канали у видимому, ближньому інфрачервоному та короткохвильовому інфрачервоному діапазонах для вивчення характеристик земного покриття.

Температура земної поверхні тісно пов'язана з типом земного покриття та його фізичними властивостями, такими як альbedo (відбивна здатність поверхні), емісивна здатність та теплоємність. Різні типи земного покриття відіграють різну роль у формуванні теплового режиму, зокрема, забудовані території (будівлі, дороги) зазвичай мають низьке альbedo (поглинають більше сонячної радіації), високу теплоємність (акумулюють тепло) та низьку евапотранспірацію, що призводить до вищих температур, рослинність (ліси, парки, газони) має вище альbedo, забезпечує тінь та активно бере участь у процесі евапотранспірації (випаровування води рослинами), що чинить охолоджуючий ефект і призводить до нижчих температур, водойми (річки, озера) мають високу теплоємність і можуть відігравати як охолоджуючу, так і зігріваючу роль залежно від сезону та часу доби, але зазвичай мають більш стабільну температуру порівняно з суходолом, відкритий ґрунт та сільськогосподарські угіддя без рослинного покриття можуть сильно нагріватися під прямими сонячними променями.

Оцінка динаміки зміни спектральних індексів, розрахованих за даними супутників, є потужним інструментом для кількісної оцінки стану та типу земного покриття та їхньої зміни з часом. Індeksi, такі як Нормалізований різницевий вегетаційний індекс (NDVI) [5, 6], Нормалізований різницевий індекс забудови (NDBI) [7, 8] та альbedo [3, 9] є чутливими до різних характеристик поверхні (щільності та здоров'я рослинності, наявності води, ступеня забудови, відбивної здатності). Дослідження часових рядів цих індексів дозволяє виявити тенденції в зміні земного покриття, а їх кореляційний аналіз з LST допомагає встановити зв'язок між станом поверхні та її температурою. Оцінка динаміки зміни цих індексів паралельно з LST є ключовою для розуміння причинно-наслідкових зв'язків у формуванні міського теплового режиму в умовах змін клімату та антропогенного впливу.

Таким чином, комплексний аналіз довготривалих супутникових даних, що включає розрахунок температури земної поверхні та різноманітних спектральних індексів, є вкрай важливим для дослідження мікроклімату міських територій, оцінки впливу різних типів земного покриття та прогнозування майбутніх змін в умовах посилення ефекту міського "острову тепла".

Мета і завдання дослідження. Метою даної роботи є дослідження довготривалої динаміки (1985-2024) річних середніх значень температури земної поверхні та ряду супутникових індексів для території м. Луцьк на основі даних D33 Landsat.

Для досягнення поставленої мети було визначено наступні завдання дослідження:

- Виконати збір, попередню обробку (фільтрація, маскування хмарності) та інтеграцію багаторічних супутникових даних Landsat 5, 7, 8, 9 для території міста Луцьк.
- Розрахувати річні середні значення температури земної поверхні (LST) для досліджуваного періоду.
- Обчислити річні середні значення низки спектральних індексів, що характеризують різні аспекти земного покриття: Нормалізованого різницевого вегетаційного індексу (NDVI), Нормалізованого різницевого індексу забудови (NDBI) та Альbedo.
- Проаналізувати динаміку річних середніх значень LST та розрахованих індексів шляхом побудови часових рядів.
- Визначити наявність та статистичну значущість довготривалих лінійних трендів у часових рядах LST та кожного з індексів.
- Дослідити кореляційні зв'язки між річними середніми значеннями LST та річними середніми значеннями спектральних індексів для оцінки впливу різних типів земного покриття на формування теплового режиму міста.

Матеріали та методи

Об'єктом дослідження є місто Луцьк, розташоване на північному заході України. Луцьк є адміністративним центром Волинської області та Луцького району. Місто лежить на річці Стир, у південно-східній частині Волинської області. Географічні координати Луцька приблизно 50°45' північної широти та 25°20' східної довготи.

Територія міста розташована в межах Волинської височини. Клімат Луцька помірно-континентальний, характеризується м'якою зимою та теплим літом. Середньорічна температура повітря становить близько 7,4 °C, з найнижчими середніми значеннями у січні (-4,9 °C) та найвищими у липні (18,0 °C).

Згідно з останніми даними, населення міста Луцька становить близько 220-221 тисячі осіб (оцінка на 2022 рік). Площа міста, за різними джерелами, становить близько 40,23 км². Слід зазначити, що після приєднання Прилуцької сільської ради у 2019 році площа Луцької міської територіальної громади збільшилась, але безпосередньо площа міста Луцька становить зазначені вище значення.

В межах міста та прилеглих територій присутні різноманітні типи земного покриття, що є важливим для аналізу температурних умов та індексів. Окрім забудованих територій, є зелені зони, включаючи парки, а також водні об'єкти, пов'язані з річкою Стир та її притоками, наприклад, зоологічний заказник місцевого значення "Гнідавське болото", частина якого розташована в межах Луцька. Це є досить типовим для міст,

розташованих у лісостеповій зоні, з характерними для регіону ґрунтами. Дослідження цих різномірних ландшафтів за допомогою супутникових даних дозволяє оцінити їх вплив на мікроклімат міста.

Набори даних

Для довготривалого аналізу температури земної поверхні (LST) та спектральних індексів на території міста Луцьк у період з 1984 по 2024 роки використовувалися дані супутників програми Landsat [10]. Ця програма, що реалізується NASA та Геологічною службою США (USGS), надає найдовший безперервний архів спостережень Землі з космосу, що робить її ідеальною для досліджень часових рядів та виявлення довготривалих змін.

У дослідженні були задіяні дані з чотирьох супутників Landsat, що працювали або працюють протягом аналізованого періоду [11]:

Landsat 5 (LT05) оснащений тематичним картографом (Thematic Mapper - TM). Надавав дані з 1984 до 2012 року. Його дані були ключовими для ранньої частини досліджуваного періоду.

Landsat 7 (LE07) оснащений покращеним тематичним картографом (Enhanced Thematic Mapper Plus - ETM+). Надає дані з 1999 року по теперішній час, хоча після збою сканера у 2003 році зображення мають пропуски даних (гар-філи).

Landsat 8 (LC08) оснащений оперативним наземним іміджером (Operational Land Imager - OLI) та термальним інфрачервоним сенсором (Thermal Infrared Sensor - TIRS). Надає дані з 2013 року. Сенсор OLI має покращену радіометричну роздільну здатність (12 біт) порівняно з попередніми супутниками Landsat.

Landsat 9 (LC09) оснащений сенсорами OLI-2 та TIRS-2, які є вдосконаленими версіями сенсорів Landsat 8. Надає дані з 2021 року, забезпечуючи продовження безперервного ряду спостережень разом з Landsat 8.

Усі дані були отримані з колекцій Collection 2 Level 2 у каталозі Google Earth Engine [12]. Цей рівень обробки продуктів Landsat є атмосферно скоригованим і надає готові до використання дані:

Дані відбиття від поверхні Землі (Surface Reflectance (SR)) у видимих, ближньому інфрачервоному (NIR) та короткохвильовому інфрачервоному (SWIR) діапазонах спектра мають просторову роздільну здатність 30 метрів і використовуються для розрахунку більшості спектральних індексів.

Дані температури земної поверхні (Surface Temperature (ST)), отримані з термальних каналів (ST_B6 для Landsat 5/7, ST_B10 для Landsat 8/9). Ці дані також є масштабованими і потребують застосування відповідного коефіцієнта та зсуву (0.00341802 та 149.0) для отримання температури в Кельвінах, яка потім конвертується у градуси Цельсія.

Використання даних Landsat Collection 2 Level 2 забезпечило узгодженість та високий ступінь обробки вхідних даних, мінімізуючи

необхідність додаткових атмосферних корекцій. Назви колекцій у каталозі GEE, що відповідали використаним даним, були наступними:

Landsat 5 TM: LANDSAT/LT05/C02/T1_L2

Landsat 7 ETM+: LANDSAT/LE07/C02/T1_L2

Landsat 8 OLI/TIRS: LANDSAT/LC08/C02/T1_L2

Landsat 9 OLI-2/TIRS-2: LANDSAT/LC09/C02/T1_L2

Вибір цих супутникових даних дозволив провести ретроспективний аналіз змін температурного режиму та характеристик земного покриття міста Луцьк за значний проміжок часу (40 років) з достатньою для регіонального масштабу просторовою деталізацією.

Порядок проведення дослідження

Дослідження проводилося з використанням платформи Google Earth Engine (GEE) та програмного середовища Python з бібліотеками geemap, geopandas, pandas, numpy, matplotlib, seaborn та scipy [13]. Процес аналізу включав наступні етапи:

Межі міста Луцьк було завантажено з векторного файлу формату Shapefile (.shp) за допомогою бібліотеки geopandas отриманого із сервісу OpenStreetMap. Отриманий полігон було конвертовано у формат ee.Geometry для використання в Google Earth Engine.

Для кожного року в досліджуваному періоді (1984-2024) та для кожного супутника Landsat (Landsat 5, 7, 8, 9) виконувався запит до відповідних колекцій продуктів Surface Reflectance (SR) та Surface Temperature (ST) (колекції 2, рівень 2) у каталозі GEE на літній період (1 червня – 31 серпня). Колекції фільтрувалися за просторовим розташуванням (область дослідження) та часовим діапазоном (червень-серпень для фокусування на літньому періоді). Знімки з високою хмарністю (більше 20%) виключалися з подальшого аналізу. Застосовувалися бітові маски якості (QA_PIXEL) для маскування пікселів, закритими хмарами, тінями від хмар, а також для вибору тільки "чистих" пікселів.

Для кожного знімка Landsat з термальним каналом (ST_B6 для Landsat 5/7, ST_B10 для Landsat 8/9) отримувалось значення пікселів термального каналу. До значень термальних каналів застосовувався стандартний коефіцієнт масштабування та зсув, визначені для продуктів Landsat Collection 2 Level 2. Отримані значення температури в Кельвінах конвертувалися у градуси Цельсія шляхом віднімання константи 273.15 і отриманий канал LST додавався до зображення.

До каналів Surface Reflectance (SR_B*) кожного знімка застосовувався стандартний коефіцієнт масштабування (0.0000275) та зсув (-0.2) для отримання дійсних значень коефіцієнтів відбиття (reflectance) у діапазоні [0, 1]. Використовуючи масштабовані канали коефіцієнтів відбиття, обчислювалися значення наступних спектральних індексів за їх

стандартними формулами: NDVI, NDBI (SWIR1/NIR) та Albedo (зважена сума).

Добре відомий і широко використовуваний нормалізований різницевий вегетаційний індекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) [14] є простим, але потужним інструментом для вимірювання зеленої рослинності. Він врівноважує розсіювання зеленого листа в ближньому інфрачервоному діапазоні з абсорбцією хлорофілу в червоному діапазоні довжин хвиль (1). Значення NDVI коливаються від -1 до 1. Негативні значення NDVI (близькі до -1) вказують на наявність води. Значення, близькі до нуля (від -0,1 до 0,1), зазвичай відображають безплідні ділянки, такі як скеля, пісок або сніг. Низькі позитивні значення (від 0,2 до 0,4) відповідають чагарникам і лукам, а високі - помірним і тропічним дощовим лісам.

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (1)$$

де ρ_{NIR} — коефіцієнт відбиття у ближньому інфрачервоному діапазоні (для даних Landsat 5/7 це канал SR_B4, для Landsat 8/9 – SR_B5); ρ_{RED} — коефіцієнт відбиття у видимому червоному діапазоні (для даних Landsat 5/7 це канал SR_B3, для Landsat 8/9 – SR_B4).

Нормалізований різницевий індекс забудови NDBI (Normalized Difference Built-up Index) [7] є одним із спектральних індексів, широко використовуваних для виділення та картографування забудованих територій у міських та приміських ландшафтах за даними дистанційного зондування. Індекс NDBI розраховується на основі відбивної здатності земної поверхні у короткохвильовому інфрачервоному (SWIR) та ближньому інфрачервоному (NIR) діапазонах спектра за наступною формулою (2):

$$NDBI = \frac{\rho_{SWIR1} - \rho_{NIR}}{\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}} \quad (2)$$

де ρ_{SWIR1} — коефіцієнт відбиття у короткохвильовому інфрачервоному діапазоні 1 (для даних Landsat 5/7 це канал SR_B5, для Landsat 8/9 – SR_B6); ρ_{NIR} — коефіцієнт відбиття у ближньому інфрачервоному діапазоні (для даних Landsat 5/7 це канал SR_B4, для Landsat 8/9 – SR_B5).

Вибір цих спектральних діапазонів обумовлений їхніми характеристиками взаємодії з різними типами земного покриття. Забудовані території (будівлі, дороги) зазвичай мають вище відбиття у SWIR діапазоні порівняно з NIR, тоді як рослинність, навпаки, має дуже низьке відбиття у SWIR та високе у NIR (внаслідок інтенсивного поглинання у SWIR та сильного відбиття у NIR через клітинну структуру листа). Вода поглинає значну частину енергії в обох цих діапазонах, особливо у SWIR. Значення NDBI лежать у діапазоні від -1 до +1. Вищі позитивні значення NDBI (> 0)

зазвичай відповідають забудованим територіям. Значення близько нуля можуть відповідати ґрунтам або територіям з розрідженою рослинністю. Від'ємні значення NDBI (< 0) типові для територій з щільним рослинним покривом та водних об'єктів.

Альbedo поверхні є важливою радіаційною властивістю [9, 15, 16], що визначає частку падаючого сонячного випромінювання, яка відбивається від поверхні. Це безрозмірний показник, що набуває значень від 0 (повне поглинання) до 1 (повне відбиття). Альbedo земної поверхні відіграє значну роль у формуванні енергетичного балансу, впливаючи на температуру поверхні: поверхні з низьким альbedo (темні, наприклад, асфальт, темний ґрунт) поглинають більше сонячної енергії і сильніше нагріваються, тоді як поверхні з високим альbedo (світлі, наприклад, сніг, світла покрівля, пісок) відбивають більшу частину випромінювання і залишаються прохолоднішими.

В контексті міських територій, зміна альbedo поверхні внаслідок урбанізації є одним з ключових факторів, що сприяють формуванню ефекту міського "острову тепла". Моніторинг змін альbedo є важливим для оцінки впливу різних типів міського покриття на тепловий режим.

Ширококутне короткохвильове альbedo (3) може бути оцінене за даними супутникових знімків як зважена сума коефіцієнтів відбиття в окремих спектральних діапазонах. У даному дослідженні для розрахунку альbedo за даними Landsat використовувався підхід, запропонований [17], який надає специфічні вагові коефіцієнти для каналів сенсора Thematic Mapper (TM) супутників Landsat 5 та Landsat 7.

Формула для розрахунку альbedo за цим методом виглядає наступним чином:

$$\text{Albedo} = \rho_{\text{Blue}} \cdot w_{\text{Blue}} + \rho_{\text{Green}} \cdot w_{\text{Green}} + \rho_{\text{Red}} \cdot w_{\text{Red}} + \rho_{\text{NIR}} \cdot w_{\text{NIR}} + \rho_{\text{SWIR1}} \cdot w_{\text{SWIR1}} + \rho_{\text{SWIR2}} \cdot w_{\text{SWIR2}} \quad (3)$$

де ρ — коефіцієнт відбиття в відповідному спектральному діапазоні (Blue, Green, Red, NIR, SWIR1, SWIR2), а w — вагові коефіцієнти, для даних Landsat TM. Зокрема, використані вагові коефіцієнти були: $w_{\text{Blue}} = 0.293$, $w_{\text{Green}} = 0.274$, $w_{\text{Red}} = 0.233$, $w_{\text{NIR}} = 0.156$, $w_{\text{SWIR1}} = 0.045$, $w_{\text{SWIR2}} = 0.013$. В даному дослідженні, незважаючи на те, що ці коефіцієнти були отримані для сенсорів TM (Landsat 5/7), вони також були застосовані для даних сенсорів OLI/TIRS (Landsat 8/9) для забезпечення послідовності методики розрахунку альbedo по всій довготривалій часовій серії. Розрахунки проводилися на основі масштабованих до $[0, 1]$ коефіцієнтів відбиття з продуктів Landsat Collection 2 Level 2.

Аналіз динаміки альbedo та його кореляції з LST дозволяє кількісно оцінити, як зміни відбивної здатності поверхні міста Луцьк впливають на його тепловий режим. Очікується, що зі зменшенням середнього альbedo

міста (наприклад, внаслідок збільшення площі темних асфальтових доріг та покрівель) температура земної поверхні буде зростати, що проявиться у сильному негативному кореляційному зв'язку між цими показниками.

До всіх числових даних, окрім даних LST застосовувалася нормалізація до діапазону $[-1, 1]$ за формулою (4):

$$x_{\text{норм.}} = 2 \cdot \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} - 1. \quad (4)$$

На основі нормалізованого фрейму даних будувався двовісний графік часових рядів, що відображає зміну річних середніх значень LST (на лівій осі Y) та всіх нормалізованих індексів (на правій осі Y).

Було проведено лінійний регресійний аналіз для виявлення довготривалих тенденцій у часових рядів річних середніх значень кожного нормалізованого параметра (також LST). Обчислювалися нахил тренду, коефіцієнт детермінації (R^2) та р-значення. Також обчислювалася матриця парних коефіцієнтів кореляції Пірсона між річними середніми значеннями LST та всіх нормалізованих індексів.

Результати та обговорення

Аналіз часових рядів та трендів

Для дослідження було використано 212 зображень із чотирьох супутників Landsat на основі яких було створено усереднені композитні зображення для кожного року.

Аналіз часових рядів (рис. 1.) та трендів (рис. 2.) дозволяє візуально оцінити загальну картину змін кожного параметра та їхню взаємодію протягом тривалого періоду, що є основою для подальшого статистичного аналізу трендів та кореляцій (рис. 1.).

Графік відображає динаміку річних середніх значень температури земної поверхні (LST) та низки досліджуваних спектральних індексів для міста Луцьк за період з 1984 по 2024 роки. Графік має дві осі Y: ліва вісь відображає значення LST у градусах Цельсія ($^{\circ}\text{C}$), права вісь - значення індексів, нормалізовані до діапазону $[-1, 1]$ для зручності порівняння.

Лінія LST демонструє значні річні коливання протягом досліджуваного періоду, що є очікуваним для середніх літніх температур. Спостерігається загальна тенденція до зростання LST протягом 40 років, хоча і з вираженими піками та спадами в окремі роки. Наприклад, помітні відносно високі значення LST у роки близько 2010-2012, 2015-2016 та після 2018 року. Діапазон річних середніх значень LST знаходиться приблизно між 22.5°C та 40.0°C . Середнє значення за весь період 32.82°C , мінімальне: 22.52°C та максимальне 38.42°C . Тренд **зростає** $+0.17^{\circ}\text{C}/\text{рік}$. Температура поверхні стабільно зростає, що свідчить про ефект урбанізації та кліматичних змін.

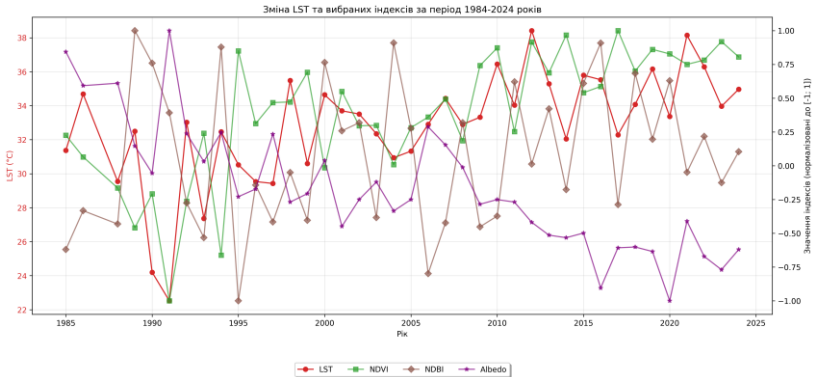


Рис. 1. Динаміка річних середніх значень температури земної поверхні (LST) та низки досліджуваних спектральних індексів для міста Луцьк за період з 1984 по 2024 роки

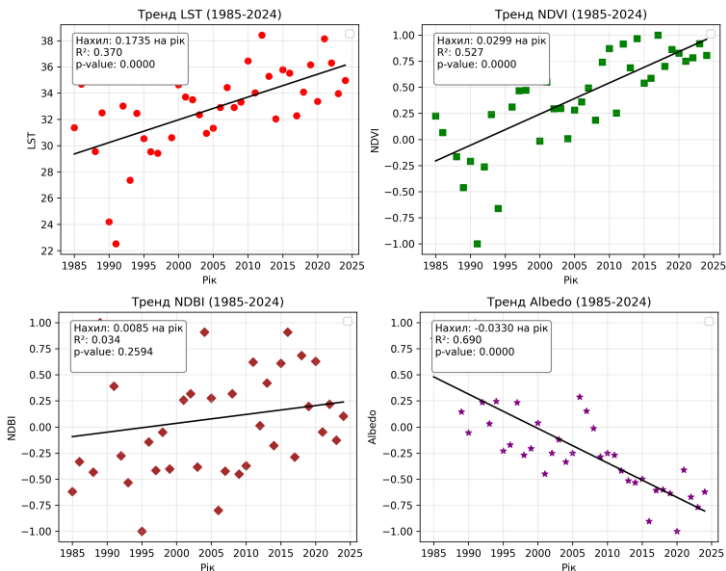


Рис. 2. Аналіз трендових значень температури земної поверхні (LST) та низки досліджуваних спектральних індексів для міста Луцьк за період з 1984 по 2024 роки

Лінія NDVI відображає зміни у щільності та здоров'ї рослинного покриву. Оскільки аналізуються літні місяці (період максимальної вегетації), значення NDVI переважно високі. Значення NDVI коливаються у верхній частині діапазону нормалізованих індексів, що свідчить про

значну частку вегетації в межах міста (парки, сквери, приватна забудова із зеленими насадженнями). Спостерігаються річні коливання, які можуть бути пов'язані з погодними умовами конкретного року, що впливають на вегетацію. Середнє значення NDVI за весь період 0.53, мінімальне 0.46, а максимальне 0.57. Тренд **зростає** $+0.0229/\text{рік}$, що вказує на збільшення зелених зон або інтенсифікацію вегетації).

Лінія NDBI відображає ступінь забудови території. Високі значення NDBI характерні для щільно забудованих районів. Значення NDBI на графіку, показують середній рівень забудови для всієї досліджуваної території міста Луцьк. Тренд демонструє слабке зростання $+0.0085/\text{рік}$.

Лінія альbedo відображає середню відбивну здатність поверхні міста. Низьке альbedo (темніші поверхні) сприяє нагріванню, тому очікується негативна кореляція з LST. Візуально лінія Альbedo може ефективно відображати зміни у типах покриття, що переважають в місті з часом (наприклад, збільшення темних асфальтових поверхонь). Тренд **зменшується** на $-0.0330/\text{рік}$. Зниження альbedo свідчить про заміну світлих поверхонь (трава, вода) на темніші (збудова, асфальт).

Кореляційний аналіз

Для оцінки взаємозв'язку між річними середніми значеннями температури земної поверхні (LST) та річними середніми значеннями розрахованих спектральних індексів для міста Луцьк за період 1984-2024 років було проведено кореляційний аналіз Пірсона. Результати аналізу представлені у вигляді кореляційної матриці (Рис. 3) та графіків розсіювання (Рис. 4), де відображено коефіцієнти кореляції між усіма парами показників.

Аналіз кореляційної матриці виявив наступні зв'язки між LST та дослідженими спектральними індексами: LST та NDVI (Нормалізований різницевий вегетаційний індекс): Коефіцієнт кореляції між LST та NDVI становить 0.573. Це вказує на помірний позитивний лінійний зв'язок. Зазвичай, для міських територій та природних ландшафтів очікується сильна негативна кореляція між LST та NDVI, оскільки більш щільна та здорова рослинність сприяє охолодженню поверхні за рахунок тіні та евапотранспірації.

Кореляція між LST та NDBI виявилася дуже слабкою позитивною, коефіцієнт складає 0.072. Очікується, що NDBI, як індикатор щільності забудови, матиме позитивну кореляцію з LST, оскільки штучні поверхні сильніше нагріваються. Низьке значення коефіцієнта може свідчити про те, що в межах всієї території міста (як усередненого значення) вплив NDBI не є домінуючим фактором у формуванні річного середнього LST порівняно з іншими факторами, або ж про складний просторовий розподіл цих характеристик.

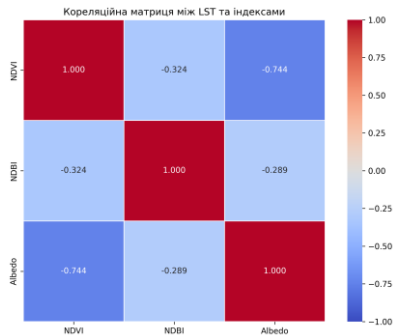


Рис. 3. Кореляційна матриця

Отриманий позитивний зв'язок є нетиповим і може потребувати додаткового аналізу або пояснень у контексті специфіки даних або території дослідження за даний період. Графік розсіювання LST vs NDVI (Рис. 4.) візуально підтверджує цю тенденцію, показуючи розкид точок, що схиляється до зростання LST при зростанні NDVI.

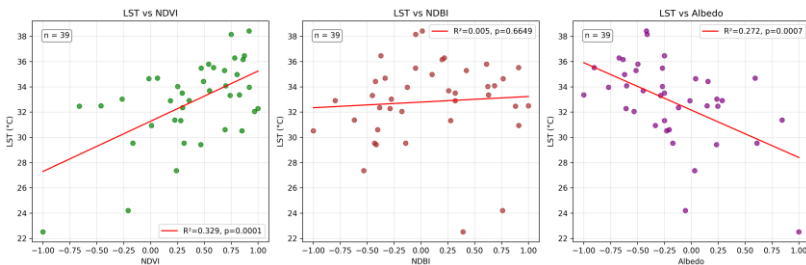


Рис. 4. Аналіз кореляційних зв'язків LST та обчислених спектральних індексів.

Між LST та нормалізованим Альбедо спостерігається помірний негативний кореляційний зв'язок з коефіцієнтом -0.522 . Це відповідає фізичним принципам: поверхні з низьким альбедо (темніші) поглинають більше сонячної радіації і, як наслідок, сильніше нагріваються (вища LST), тоді як поверхні з високим альбедо (світліші) відбивають більше радіації і залишаються прохолоднішими (нижча LST).

Висновки

Результати кореляційного аналізу виявили очікуваний негативний зв'язок між LST та Альбедо, що свідчить про важливість відбивної здатності поверхні для її нагріву.

Однак, отримані позитивні кореляції між LST та вегетаційним індексом NDVI [18], а також дуже слабкий зв'язок з індексами забудови (NDBI) є неочікуваними та суперечать типовим результатам подібних досліджень для міських територій. У більшості випадків щільна рослинність та висока забудова є ключовими факторами, що зумовлюють формування "островів тепла" (позитивна кореляція LST з NDBI) та "островів прохолоди" (негативна кореляція LST з NDVI).

Нетипові результати можуть бути викликані низкою причин, які потребують подальшого дослідження

Використання річних середніх значень по всій території міста може усереднювати просторові варіації, де зв'язки між LST та індексами можуть бути різними (наприклад, у центрі міста та на околицях). Просторово-диференційований кореляційний аналіз міг би надати більш детальну картину.

Незважаючи на нетипові результати для деяких індексів, сильні негативні кореляції з альбедо підтверджують їх важливу роль у регулюванні температури поверхні міста. Це вказує на необхідність збереження та збільшення площі водних поверхонь та використання матеріалів з високим альбедо при міському плануванні для пом'якшення ефекту міського "острову тепла".

Кореляційний аналіз виявив значущі зв'язки між LST та спектральними індексами для міста Луцьк у період 1984-2024 років. Негативна кореляція з Альбедо вказує на важливість відбивної здатності поверхні. Однак, неочікувані позитивні кореляції з вегетаційним індексом (NDVI) та слабкі зв'язки з індексами забудови (NDBI) потребують подальшого детального аналізу та інтерпретації з урахуванням просторових особливостей та інших факторів, що впливають на формування міського теплового режиму в даному регіоні.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Це дослідження було профінансовано Deutscher Akademischer Austauschdienst у рамках програми Future Ukraine: Research Grants for Ukrainian Master's students and researchers, 2024/2025 (57755101)

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті. Додаткові матеріали можуть бути надані за особистим запитом.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. Kashtan, V. I., Serhieieva, K. L., Korobko, O. V., et. al. Search and assessment of urban heat islands on digital satellite images. *Systemni tekhnolohii*. 2023. Vol. 3, No. 146. C. 87–98.
2. Lischenko, L., Kudryashov, A. The results of the study of spatio-temporal changes in surface temperatures of Zaporizhya based on satellite data. *Ukrainian journal of remote sensing*. 2021. Vol. 8, No. 3. C. 27–36.
3. Ul, A. V., Melnyk, O. V., Melnyk, Yu. A., ta in. Ohliad spektralnykh indeksiv dlia dystantsiinykh doslidzhen urbanizovanykh terytorii. *Suchasni tekhnolohii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi*. 2024. No. 21. C. 253–270.
4. Ul, A. V., Melnyk, O. V., Melnyk, Yu. A., ta in. Dystantsiinyi monitorynh teplovoho rezhymu v mistakh: teoretychni osnovy. *Suchasni tekhnolohii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi*. 2023. No. 20. C. 144–157.
5. Gandhi, G. M., Parthiban, S., Thummalu, N., ta in. Ndvi: Vegetation Change Detection Using Remote Sensing and Gis – A Case Study of Vellore District. *Procedia Computer Science*. 2015. Vol. 57. C. 1199–1210.
6. Melnyk, O., Brunn, A. Analysis of Spectral Index Interrelationships for Vegetation Condition Assessment on the Example of Wetlands in Volyn Polissya, Ukraine. *Earth* 2025, Vol. 6, Page 28. 2025. Vol. 6, No. 2. C. 28.
7. Muhaimin, M., Fitriani, D., Adyatma, S., ta in. Mapping build-up area density using the normalized difference built-up index (NDBI) and urban index (UI) in the wetland of the city of Banjarmasin. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 1089, No. 1. C. 012036.
8. Guha, S., Govil, H., Dey, A., ta in. Analytical study of land surface temperature with NDVI and NDBI using Landsat 8 OLI and TIRS data in Florence and Naples city, Italy. *European Journal of Remote Sensing*. 2018. Vol. 51, No. 1. C. 667–678.
9. He, T., Liang, S., Wang, D., ta in. Evaluating land surface albedo estimation from Landsat MSS, TM, ETM+ +, and OLI data based on the unified direct estimation approach. *Remote Sensing of Environment*. 2018. Vol. 204. C. 181–196.
10. Woodcock, C. E., Allen, R., Anderson, M., ta in. Free access to Landsat imagery. / *United States, United States*: 2008. 1011 p.
11. Landsat Science: URL: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/> (data zvernennia: 19.05.25).
12. Landsat Collections in Earth Engine | Earth Engine Data Catalog | Google for Developers: URL: <https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/landsat> (data zvernennia: 19.05.25).
13. Earth Engine and Geemap - Geospatial Data Science with Python: URL: <https://locatopress.com/book/gee> (data zvernennia: 19.05.25).

14. Crippen, R. E. Calculating the vegetation index faster. *Remote Sensing of Environment*. 1990. Vol. 34, No. 1. C. 71–73.
15. Wulder, M. A., Loveland, T. R., Roy, D. P., та ін. Current status of Landsat program, science, and applications. *Remote Sensing of Environment*. 2019. Vol. 225. C. 127–147.
16. Wan, Z. та ін. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space. *Transactions on geoscience and remote sensing*. 1996. Vol. 34, No. 4.
17. Tasumi, M., Allen, R. G., Trezza, R. At-Surface Reflectance and Albedo from Satellite for Operational Calculation of Land Surface Energy Balance. *Journal of Hydrologic Engineering*. 2008. Vol. 13, No. 2. C. 51–63.
18. V. Rasiun, V. Voloshyn, O. Rudyk, O. Melnyk, A. Vovk. Doslidzhennia vykorystannia metodiv DZZ dlia monitorynhu ta kartohrafuvannia torfovyyshch. *Cuchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva*, 2025. Vol. I(49). C. 201–2011.

Література

1. Kashtan, V. I., Serhieieva, K. L., Korobko, O. V., **et. al.** Search and assessment of urban heat islands on digital satellite images. *Системні технології*. 2023. Vol. 3, No. 146. C. 87–98.
2. Lischenko, L., Kudryashov, A. The results of the study of spatio-temporal changes in surface temperatures of Zaporizhya based on satellite data. *Ukrainian journal of remote sensing*. 2021. Vol. 8, No. 3. C. 27–36.
3. Уль, А. В., Мельник, О. В., Мельник, Ю. А., та ін. Огляд спектральних індексів для дистанційних досліджень урбанізованих територій. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2024. No. 21. C. 253–270.
4. Уль, А. В., Мельник, О. В., Мельник, Ю. А., та ін. Дистанційний моніторинг теплового режиму в містах: теоретичні основи. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2023. No. 20. C. 144–157.
5. Gandhi, G. M., Parthiban, S., Thummala, N., та ін. Ndvi: Vegetation Change Detection Using Remote Sensing and Gis – A Case Study of Vellore District. *Procedia Computer Science*. 2015. Vol. 57. C. 1199–1210.
6. Melnyk, O., Brunn, A. Analysis of Spectral Index Interrelationships for Vegetation Condition Assessment on the Example of Wetlands in Volyn Polissya, Ukraine. *Earth* 2025, Vol. 6, Page 28. 2025. Vol. 6, No. 2. C. 28.
7. Muhaimin, M., Fitriani, D., Adyatma, S., та ін. Mapping build-up area density using the normalized difference built-up index (NDBI) and urban index (UI) in the wetland of the city of Banjarmasin. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 1089, No. 1. C. 012036.
8. Guha, S., Govil, H., Dey, A., та ін. Analytical study of land surface temperature with NDVI and NDBI using Landsat 8 OLI and TIRS data in Florence and Naples city, Italy. *European Journal of Remote Sensing*. 2018. Vol. 51, No. 1. C. 667–678.

9. He, T., Liang, S., Wang, D., та ін. Evaluating land surface albedo estimation from Landsat MSS, TM, ETM+ +, and OLI data based on the unified direct estimation approach. *Remote Sensing of Environment*. 2018. Vol. 204. С. 181–196.
10. Woodcock, C. E., Allen, R., Anderson, M., та ін. Free access to Landsat imagery. / United States, United States: 2008. 1011 p.
11. Landsat Science: URL: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/> (дата звернення: 19.05.25).
12. Landsat Collections in Earth Engine | Earth Engine Data Catalog | Google for Developers: URL: <https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/landsat> (дата звернення: 19.05.25).
13. Earth Engine and Geemap - Geospatial Data Science with Python: URL: <https://locatepress.com/book/gee> (дата звернення: 19.05.25).
14. Crippen, R. E. Calculating the vegetation index faster. *Remote Sensing of Environment*. 1990. Vol. 34, No. 1. С. 71–73.
15. Wulder, M. A., Loveland, T. R., Roy, D. P., та ін. Current status of Landsat program, science, and applications. *Remote Sensing of Environment*. 2019. Vol. 225. С. 127–147.
16. Wan, Z. та ін. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space. *Transactions on geoscience and remote sensing*. 1996. Vol. 34, No. 4.
17. Tasumi, M., Allen, R. G., Trezza, R. At-Surface Reflectance and Albedo from Satellite for Operational Calculation of Land Surface Energy Balance. *Journal of Hydrologic Engineering*. 2008. Vol. 13, No. 2. С. 51–63.
18. В. Расюн, В. Волошин, О. Рудик, О. Мельник, А. Вовк. Дослідження використання методів ДЗЗ для моніторингу та картографування торфовищ. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*,. 2025. Vol. I(49). С. 201–2011.

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 28.05.2025	Received 28.05.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 29.05.2025	Received in revised form 29.05.2025
Прийнято 01.06.2025	Accepted 01.06.2025
Опубліковано 25.06.2025	Published 25.06.2025

A.V. Uhl

D.Sc. in Engineering, Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5249-0828>
Department of Geodesy, Land Management and Cadastre
Lesya Ukrainka Volyn National University, Voli ave., 13, Lutsk, Ukraine, 43025

O.V. Melnyk

Ph.D. in Engineering, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-5429-4038>
Department of Geodesy, Land Management and Cadastre
Lesya Ukrainka Volyn National University, Voli ave., 13, Lutsk, Ukraine, 43025

Yu.A. Melnyk*

Ph.D. in Engineering, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5186-7032>
Department of Building and Civil Engineering
Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

L.A. Vakulyuk

Senior Lecturer, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1087-3927>

Department of Geodesy, Land Management and Cadastre

Lesya Ukrainka Volyn National University, Voli ave., 13, Lutsk, Ukraine, 43025

*corresponding author e-mail: y.melnyk@lntu.edu.ua

The relationship between land surface temperature and land cover characteristics in Lutsk: time series analysis of Landsat satellite indices.

How to Cite:

Uhl, A.V., Melnyk, O. V., Melnyk, Yu. A., Vakulyuk, L. A. (2025). The relationship between land surface temperature and land cover characteristics in Lutsk: time series analysis of Landsat satellite indices. *Modern technologies and calculation methods in construction*, 23, 353-369. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-31](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-31)

Abstract. Rapid urban population growth exacerbates the urban heat island effect (UHI), which has significant environmental and health implications. Understanding the dynamics of land surface temperature (LST) and its relationship with land cover types is crucial to achieving sustainable urban development. Remote sensing of the Earth is a valuable tool for monitoring and studying the temperature regime of urban areas, as it allows LST information to be acquired over large areas with high spatial and temporal resolution. Unlike traditional weather stations, satellites provide a synoptic overview of an area, which is crucial for studying the spatial patterns of the UHI effect. The Landsat satellites are particularly important as they have provided long-term archival records since the 1980s, and their thermal channels are suitable for calculating LST. They also have channels in the visible, near-infrared and short-wave infrared ranges for studying land cover characteristics. This study analyses the long-term dynamics of the annual average LST values and the NDVI and NDBI spectral indices for Lutsk between 1984 and 2024, using Landsat satellite data (5, 7, 8, and 9) and the Google Earth Engine platform. Time series analysis and linear trend, and correlation analysis methods were applied. Significant annual fluctuations in LST were found, as well as a general trend towards growth (+0.17°C/year). A positive trend in NDVI and a negative trend in albedo were observed. Correlation analysis revealed the anticipated strong negative correlation between LST and albedo. However, the positive correlations of LST with vegetation indices and the weak relationships with built-up/bare land indices warrant further investigation into spatial patterns. The results of the study are important for assessing the microclimate and supporting urban planning decisions.

Keywords: land surface temperature, spectral indices, time series, correlation, Landsat, Google Earth Engine

УДК 625.7/8

О. О. Фоменко

асистент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4429-1706>

Кафедра будівництва та експлуатації автомобільних доріг ім. О.К. Бірулі
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25,
Харків, Україна, 61002

А. В. Сєдов*

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7879-6614>

Кафедра будівництва та експлуатації автомобільних доріг ім. О.К. Бірулі
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25,
Харків, Україна, 61002

*автор-кореспондент, e-mail: avs.1708@ukr.net

Використання золошлакових сумішей для будівництва шарів основи дорожнього одягу

Цитувати як:

Фоменко, О. О., Сєдов, А. В. (2025). Використання золошлакових сумішей для будівництва шарів основи дорожнього одягу. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 23, 370-380. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-32](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-32)

© 2025, Фоменко О. О., Сєдов А. В.

Анотація. У статті наведено інформацію щодо обсягу утворення золошлакових відходів від спалювання вугілля, обсягу їх утилізації. Дані загальні відомості щодо обсягу утворення золошлакових побічних продуктів у зарубіжній практиці, їх практичного та ефективного використання. У світовій практиці золошлаки зазвичай використовуються у виробництві будівельних матеріалів, таких як: бетон, асфальтобетонні суміші, цегли, керамічна плитка, теплоізоляція тощо. Залучення цих матеріалів до технологічного процесу дорожнього будівництва дозволить знизити негативний вплив на навколишнє середовище та розширити ресурсну базу галузі. Золошлакові відходи складаються з комбінації золуносу та паливного шлаку, які мають принципові відмінності у своїй структурі.

У ході проведених досліджень виконано оцінку деформаційних характеристик цього техногенного ґрунту в залежності від ступеня його ущільнення та вологості. Аналіз показав, що збільшення щільності на 0,01 од. коефіцієнт ущільнення дає приріст модуля пружності від 6 % до 7 %, а модуля деформації від 2 % до майже 5 %. Вплив вологості на деформативні параметри золошлакових сумішей суттєвий, хоча й децю нижчий за вплив щільності. Причому при оптимальній вологості значення модулів пружності та деформації має найменшу величину.

Аналіз хімічного та фазового складів золошлакових сумішей свідчить про схожість цих техногенних ґрунтів з природними піщаними та глинистими ґрунтами. Однак структура золошлакових сумішей визначає ряд істотних особливостей порівняно з природними ґрунтами. Порівняння величини модулів

деформації природних ґрунтів і золошлакових сумішей показує, що цей показник у техногенного ґрунту децю нижчий, ніж у піщаних ґрунтів, але не поступається природним глинисто-пилуватим ґрунтам.

Оцінено його придатність як будівельний матеріал для будівництва шарів основи дорожнього одягу автомобільних доріг.

Ключові слова: золошлакова суміш, дорожній одяг, деформаційні характеристики, вологість, коефіцієнт ущільнення, структурна міцність

Вступ

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Технологічний процес виробництва електроенергії на ТЕС призводить до утворення значної кількості відходів у формі шлаку і золи. Шлак і золу відносять до великоуламкових відходів.

Теплоелектростанція (ТЕС) потужністю 1 МВт/добу спалює до 10000 т кам'яного або бурого вугілля, при цьому формуються близько 2500-1000 т відходів, в залежності від типу вугілля та умов спалювання [1]. В світі широко розповсюджена практика утилізації золошлаків через будівництво доріг [2]. Позитивний досвід застосування цих матеріалів мають, наприклад США, Франція, Німеччина, Японія, Польща, Індія (табл. 1) [3, 4, 5, 6]. На рис. 1 показані напрямки використання золошлакових матеріалів. Як бачимо, у світовій практиці золошлаки зазвичай використовуються у виробництві будівельних матеріалів, таких як: бетон, асфальтобетонні суміші, цегли, керамічна плитка, теплоізоляція тощо.

Таблиця 1. Обсяги виробництва та утилізації золошлакових відходів в Україні та світі

Країна або група країн	Обсяг ЗВ на рік, млн. т	Відсоток утилізації, %
Європа (15 країн ЄС)	52,6	90,9
Індія	131,0	55,7
Японія	11,1	96,4
США	118,0	42,1
Україна	26,6	10

Застосування шлаків для будівництва доріг обумовлено не тільки питаннями зниження вартості будівництва. Мільйони тон відходів використовуються у дорожньому будівництві, вивільняючи тим самим значні території, які займані полігонами та звалищами.

Залучення цих матеріалів до технологічного процесу дорожнього будівництва дозволить знизити негативний вплив на навколишнє середовище та розширити ресурсну базу галузі.



Рис. 1. Використання золошлакових матеріалів в світі [5]

Застосування шлаків стає ще ефективнішим за рахунок нерівномірного поширення території країни, за рахунок чого знижується дальність транспортування матеріалів до об'єктів будівництва. Технології спалювання вугілля на українських ТЕС в основному передбачають гідравлічний спосіб видалення золи, з використанням води або водного лужного розчину. Для детального вивчення властивостей золошлаків, необхідно дослідити їх мінералогічний склад, сорбційну активності та структуру поверхні, які залежать від технології спалювання та ефективності систем золоуловлювання.

Вміст різних хімічних сполук в золошлакових відходах напряму залежить від типу та складу палива. Для об'єктів паливно-енергетичного комплексу України, на яких експлуатується вугільне паливо різних марок, концентрації компонентів у золошлакових відходах (кремнію, алюмінію і заліза) різні. Також невелика частина елементів присутня в золошлакових відходах у вигляді сульфатів CaSO_4 , MgSO_4 та FeSO_4 (табл. 2) [2].

Таблиця 2. Усереднений хімічний склад мінеральної частини золошлакових відходів деяких твердопаливних ТЕС [4]

Підприємство теплоенергетики	Мінеральні золошлакоутворюючі компоненти, мас. %							
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3
Старобешівська ТЕС	44–50	24 – 30	8 – 6	2,5 – 4,6		–		1,2
Миронівська ТЕС	67,8	19,8	10,9	5,5		2,8		2,1–7
Вуглегірська ТЕС	16,7	40,6	23,0	8,4		–		0,02
Краматорська ТЕЦ	49,4	22,5	17,1	10,05		–		–
Бурштинська ТЕС	48,6	23,3	15,3	4,4	2,2	0,5	1,6	0,47

Згідно з табл. 2 основну масу золошлакових відходів в середньому складають оксид кремнію – від 45 % до 60 %, оксид кальцію – від 2,5 % до 9,6 %, оксид заліза – від 4,1 % до 10,6 %, оксид магнію – від 0,5 % до 4,8 %, оксид сірки – від 0,02 % до 7 %.

оксид алюмінію – від 10,1 % до 21,8 % і триоксид сірки – від 0,03 % до 2,7 % [2].

Таким чином, можна зробити висновок, що для будівництва доріг можна використовувати всі види відходів згоряння на вугільних електростанціях.

Мета і завдання дослідження. Згідно з ДБН В.2.3-4, через сприятливі кліматичні умови, використовувати відходи згоряння вугільних теплових електростанцій можна для будівництва доріг по всій території України [6]. Головною перешкодою, яка стримує повномасштабне застосування золошлакових відходів, є недостатня вивченість механічних властивостей цих матеріалів. Таким чином, метою дослідження є обґрунтувати можливість застосування золошлакових сумішей з відвалів ТЕС при будівництві земляного полотна та шарів основи дорожнього одягу.

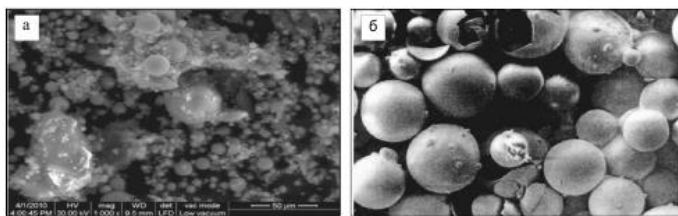
Матеріали та методи

Методологічною основою для вирішення поставлених завдань є системний підхід у вивченні досвіду застосування золошлакових сумішей при будівництві автомобільних доріг та вплив факторів на їх фізико-механічні властивості.

Результати та обговорення

Золошлакові відходи складаються із золи-уносу та шлаку, які мають відмінності структури.

Частинки зол-уносу, як правило мають сферичну або близьку до неї форму. Однак золи-уносу не завжди мають однорідні частинки. Частина їх може складатися повністю зі скла, деякі можуть мати у середині включення мінералів або коксових зерен. Зустрічаються також і порожнисті кульки (мікросфера), які утворені в результаті потрапляння повітря до розплаву перед застиганням. Розмір частинок від 3 мкм до 150 мкм [7] (рис. 2).



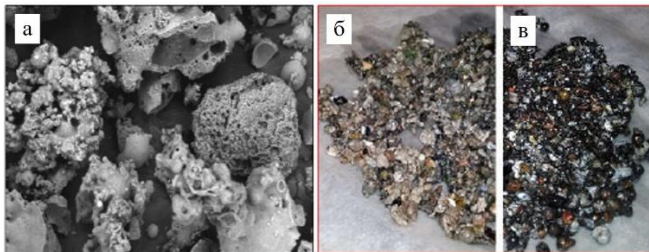
а – золи-винесення; б – зольні мікросфери

Рис. 2. Зовнішній вигляд золи-винесення під мікроскопом

Також в процесі згоряння можуть утворюватися частинки шлаку і золи-уносу неправильної та губчастої форми, а також мати ядро із кристалічних речовин.

Крупні фракції золошлакових відходів містять агрегати, які утворюються при злипанні окремих зерен (такі структури, як правило неоднорідні і мають невисоку міцність).

Шлакові частинки можуть бути двох різних видів, в залежності від системи видалення відходів: система рідкого видалення шлаку або система твердого видалення шлаку (рис. 3).



а – пористі частинки сплавлених агрегатів; б – пористий шлак;
в – щільний шлак

Рис. 3. Зовнішній вигляд паливного шлаку

Частинки із системи рідкого шлаковидалення створюють зерна правильної форми з гладкою поверхнею без великої кількості пір. Такий матеріал менш схильний до водопоглинання, має високу міцність на стиск і утворює більші частинки шлаку. Подібна форма часток суттєво впливає на фізико-механічні характеристики золошлакових сумішей.

Найбільший вплив на механічні характеристики матеріалів, з яких складаються шари основи дорожнього одягу, має зміна таких параметрів як вологість та коефіцієнт ущільнення. На них впливають фактори середовища, які протягом експлуатації автомобільної дороги викликають зміни у самій структурі матеріалу. Отже, в ході життєвого циклу автомобільних доріг змінюються параметри міцності та деформативності будь-якого матеріалу в шарах дорожнього одягу.

В роботі виконаний аналіз дослідження характеристик міцності золошлакових сумішей в залежності від щільності і вологості. На рис 4 представлені результати визначення модуля деформації золошлакових сумішей в залежності від коефіцієнта ущільнення. Зростання модуля деформації при збільшенні щільності пояснюється збільшенням кількості контактів частинок у структурі матеріалу, що веде до зниження контактної напруги та зменшення зминання маломіцних агрегатів. Різкий приріст модуля при тиску 0,3 мПа пов'язаний з таким станом зразка, при якому не відбувається перепакування частинок за рахунок ковзання агрегатів, а осідання може пояснюватися руйнуванням частинок, щільно защемлених у своїх положеннях. Такі зміни структури золошлакових сумішей раніше були описані Kim та ін. [7, 8, 9, 10, 11, 12].

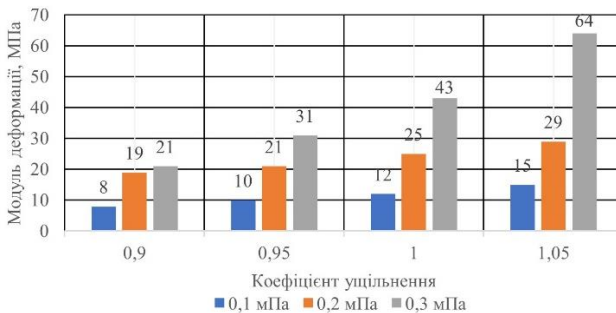


Рис. 4. Залежність модуля деформації від коефіцієнта ущільнення

На рис. 5 представлені результати визначення модуля деформації золошлакових сумішей при різній вологості та постійному коефіцієнті ущільнення 0,95.

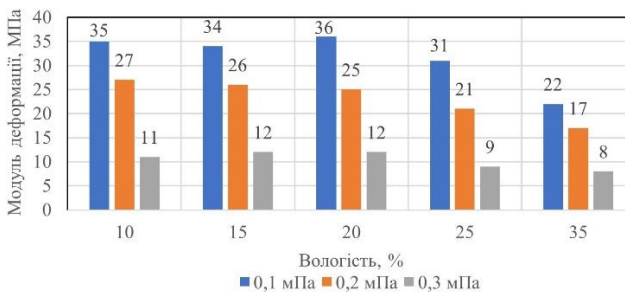


Рис. 5. Залежність модуля деформації від вологості

Випробування золошлакових сумішей із різною вологістю вказують на зниження модуля деформації зі зростанням вологості. При збільшенні вологості вода сприяє розсуванню частинок золошлакової суміші, що послаблює структуру. З іншого боку, збільшення товщини водних плівок сприяє збільшенню осідання, так як їх здатність деформуватися вище, ніж у частинок золошлакової суміші.

Подібні залежності змін модулів пружності були отримані Kim та ін, що вказує на схожість поведінки золошлакових сумішей різного походження.

Крім цього, неоднорідність також може викликати зміни механічних характеристик золошлакових сумішей [10, 11, 12]. Збільшення вмісту пористого шлаку має негативний вплив на модуль деформації як дрібно-, так і в середньозернистих золошлакових сумішей. При цьому середньозернисті суміші, які зазвичай мають велику величину модуля

деформації, з додаванням пористого шлаку мають гірші деформаційні параметри в порівнянні з дрібнозернистими. У першу чергу це пов'язано з високою подрібненістю пористого шлаку.

Як відомо, в процесі ущільнення відбувається більш компактне пакування частинок за рахунок місцевих зсувів і зісковзування дрібніших частинок у пори агрегатів, що ще більше зміцнює скелет ґрунту. Після закінчення процесу ущільнення ці зрушення практично згасають і матеріал починає працювати на стадії оборотних деформацій. Чим вище вихідний коефіцієнт ущільнення, тим більше щільна структура скелета матеріалу утворюється у зразку, а отже, розподіл навантаження відбудеться на більшу кількість точок контакту. Крім збільшення структурної міцності, це знижує загальну деформативність матеріалу, чим і обумовлено зростання модуля пружності (рис. 6) [12].

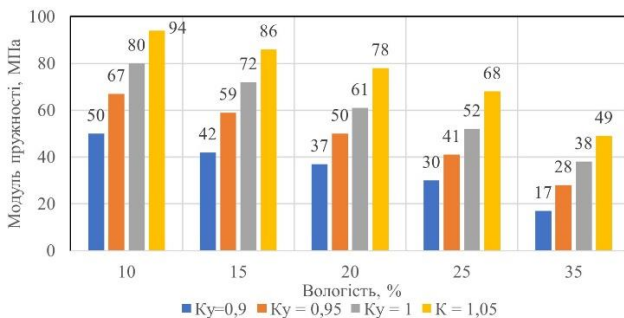


Рис.6 Залежність модуля пружності золошлакових сумішей від вологості та коефіцієнта ущільнення

На противагу ущільненню, підвищення вологості золошлакової суміші викликає розущільнення скелета, яке суттєво знижує здатність матеріалу чинити опір навантаженням. Причому, чим вища вологість, тим більший негативний ефект. Досягнення повної вологості створює ефект зважування частинок. У такому стані число контактів частинок зменшується, а діючий поровий тиск води розущільнює матеріал. Зростання щільності скелета золошлакової суміші викликає підвищення міцності масиву, однак, лише до досягнення максимальної щільності сухого ґрунту. При подальшому ущільненні приросту міцності немає, отже, переущільнення золошлакової суміші недоцільне.

Значення параметрів міцності золошлакової суміші дещо відрізняються, залежно від їх походження, проте не поступаються за міцністю природним ґрунтам.

Загальні залежності зміни параметрів міцності золошлакової суміші при зміні вологості і щільності схожі для всіх сумішей, незалежно від генезису.

Висновки

Були розглянуті залежності деформативних параметрів золошлакових сумішей від щільності матеріалу. Аналіз показав, що збільшення щільності на 0,01 од. коефіцієнт ущільнення дає приріст модуля пружності від 6 % до 7 %, а модуля деформації від 2 % до майже 5 %.

Вплив вологості на деформативні параметри золошлакових сумішей суттєвий, хоча й дещо нижчий за вплив щільності. Причому при оптимальній вологості значення модулів пружності та деформації має найменшу величину.

Аналіз хімічного та фазового складів золошлакових сумішей свідчить про схожість цих техногенних ґрунтів з природними піщаними та глинистими ґрунтами. Однак структура золошлакових сумішей визначає ряд істотних особливостей порівняно з природними ґрунтами. Порівняння величини модулів деформації природних ґрунтів і золошлакових сумішей показує, що цей показник у техногенного ґрунту дещо нижчий, ніж у піщаних ґрунтів, але не поступається природним глинисто-пилуватим ґрунтам.

Таким чином, застосування золошлакових сумішей з ТЕС для спорудження насипів земляного полотна, шарів дорожнього одягу є перспективним та актуальним напрямком утилізації цього техногенного ґрунту.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. Khlopytskyi O. (2014). State, problems and prospects of ash-slag waste recycling of Ukrainian thermal power stations // *ScienceRise*, 4, № 2, 4.
2. Thermal electricity. Режим доступу: <https://www.engie.com/en/activities/thermal-energy/thermal-power-stations> (дата звернення 08.05.2025). – Назва з екрана.
3. Baykala G. (2004). Highway embankment construction using fly ash in cold regions / G. Baykala, A. Edinçlilerb, A. Saygılıa // *Resources, Conservation and Recycling*, 42, 209-222.
4. Haleema A. (2016). Critical factors for the successful usage of fly ash in roads & bridges and embankments: Analyzing indian perspective / A. Haleema, S. Luthrab, B. Mannana, S. Khuranaa, S. Kumarc // *Resources Policy*, 49, 334-348.
5. Hadbaatar A. (2016). Study of Ash-Slag Wastes of Electric Power Plants of Mongolia Applied to their Utilization in Road Construction / A. Hadbaatar, N.A. Mashkin, N.G. Stenina // *Procedia Engineering*, 150, 1558-1562.
6. Mukherjee P.S. (2013). Exploring Fly Ash Utilization in Construction of Highways in India / P.S. Mukherjee, G. Vesmawala // *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 8, Pp 23-32.
7. Pandian N.S. (2004). Fly ash characterization with reference to geotechnical application / N.S. Pandian // *Journal Indian Institute of Science*, 84, 189-216.
8. Pal S. K. (2009). Shear strength behavior of Indian flu ashes / S. K. Pal, A. Ghosh // *Indian Geotechnical Conference Geotechnics in Infrastructure Development (GEOTIDE)*, 1, 18-22.
9. Jakka R.S. Shear Strength Characteristics of Loose and Compacted Pond Ash / R.S. Jakka, M. Datta, G.V. Ramana // *J.Geotech and Geol*, 28(6), 763-778.
10. Martin J. P. Properties and use of fly ashes for embankments / J.P. Martin, R.A., B.J. Collins, F.J. Biehl // *Energy*, 116(2), 71–86.
11. Kumar D. (2014). Geotechnical Properties of Fly Ash and Bottom Ash Mixtures in Different Proportions / D. Kumar, N. Kumar, A. Gupta // *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 3, 9, 1487-1494.
12. Kim B. Geotechnical Properties of Fly and Bottom Ash Mixtures for Use in Highway Embankments / B. Kim, M. Prezzi, R. Salgaro // *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 131, 7, 914-924.

Література

1. Khlopytskyi O. (2014). State, problems and prospects of ash-slag waste recycling of Ukrainian thermal power stations // *ScienceRise*, 4, № 2, 4.
2. Thermal electricity. Режим доступу: <https://www.engie.com/en/activities/thermal-energy/thermal-power-stations> (дата звернення 08.05.2025). – Назва з екрана.
3. Baykala G. (2004). Highway embankment construction using fly ash in cold regions / G. Baykala, A. Edinçlilerb, A. Saygılıa // *Resources, Conservation and Recycling*, 42, 209-222.

4. Haleema A. (2016). Critical factors for the successful usage of fly ash in roads & bridges and embankments: Analyzing indian perspective / A. Haleema, S. Luthrab, B. Mannana, S. Khuranaa, S. Kumarc // Resources Policy, 49, 334-348.
5. Hadbaatar A. (2016). Study of Ash-Slag Wastes of Electric Power Plants of Mongolia Applied to their Utilization in Road Construction / A. Hadbaatar, N.A. Mashkin, N.G. Stenina // Procedia Engineering, 150, 1558-1562.
6. Mukherjee P.S. (2013). Exploring Fly Ash Utilization in Construction of Highways in India / P.S. Mukherjee, G. Vesmawala // Journal of Mechanical and Civil Engineering, 8, Pp 23-32.
7. Pandian N.S. (2004). Fly ash characterization with reference to geotechnical application / N.S. Pandian // Journal Indian Institute of Science, 84, 189-216.
8. Pal S. K. (2009). Shear strength behavior of Indian flu ashes / S. K. Pal, A. Ghosh // Indian Geotechnical Conference Geotechnics in Infrastructure Development (GEOTIDE), 1, 18-22.
9. Jakka R.S. Shear Strength Characteristics of Loose and Compacted Pond Ash / R.S. Jakka, M. Datta, G.V. Ramana // J.Geotech and Geol, 28(6), 763-778.
10. Martin J. P. Properties and use of fly ashes for embankments / J.P. Martin, R.A., B.J. Collins, F.J. Biehl // Energy, 116(2), 71–86.
11. Kumar D. (2014). Geotechnical Properties of Fly Ash and Bottom Ash Mixtures in Different Proportions / D. Kumar, N. Kumar, A. Gupta // International Journal of Science and Research (IJSR), 3, 9, 1487-1494.
12. Kim B. Geotechnical Properties of Fly and Bottom Ash Mixtures for Use in Highway Embankments / B. Kim, M. Prezzi, R. Salgaro // Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 131, 7, 914-924.

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 19.05.2025	Received 19.05.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 01.06.2025	Received in revised form 01.06.2025
Прийнято 01.06.2025	Accepted 01.06.2025
Опубліковано 25.06.2025	Published 25.06.2025

O. O. Fomenko

assistant, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4429-1706>

Department Construction and operation of highways named after O.K. Birulya

Kharkiv National Automobile and Highway University, Yaroslav Mudrogo str., 25, Kharkiv, Ukraine, 61002

A. V. Siedov*

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7879-6614>

Department Construction and operation of highways named after O.K. Birulya

Kharkiv National Automobile and Highway University, Yaroslav Mudrogo str., 25, Kharkiv, Ukraine, 61002

*corresponding author, e-mail: avs.1708@ukr.net

Use of ash-slag mixtures for the construction of road base layers

How to Cite:

Fomenko, O. O., Siedov, A. V. (2025). Use of ash-slag mixtures for the construction of road base layers. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 23, 370-380. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-32](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-32)

Abstract. The article provides information on the volume of formation of ash and slag waste from coal combustion, and the volume of their utilization. This is general information on the volume of formation of ash and slag by-products in foreign practice, and their practical and effective use. In world practice, ash and slag are usually used in the production of building materials, such as concrete, asphalt concrete mixtures, bricks, ceramic tiles, thermal insulation, etc. The involvement of these materials in the technological process of road construction will reduce the negative impact on the environment and expand the resource base of the industry. Ash and slag waste consist of a combination of ash-carryover and fuel slag, which have fundamental differences in their structure.

During the conducted research, an assessment of the deformation characteristics of this technogenic soil was performed depending on the degree of its compaction and humidity. The analysis showed an increase in density by 0.01 units. The compaction coefficient gives an increase in the modulus of elasticity from 6% to 7%, and the modulus of deformation from 2% to almost 5%. The influence of humidity on the deformation parameters of ash-slag mixtures is significant, although somewhat lower than the influence of density. Moreover, at optimal humidity, the value of the modulus of elasticity and deformation is the smallest.

Analysis of the chemical and phase compositions of ash-slag mixtures indicates the similarity of these technogenic soils with natural sandy and clay soils. However, the structure of ash-slag mixtures determines a number of significant features compared to natural soils. Comparison of the magnitude of the modulus of deformation of natural soils and ash-slag mixtures shows that this indicator in technogenic soil is somewhat lower than in sandy soils, but is not inferior to natural clay-dusty soils.

Its suitability as a building material for the construction of base layers of road pavements of highways was assessed.

Keywords: ash-slag mixture, road surface, deformation characteristics, humidity, compaction coefficient, structural strength

УДК 504.4:556.5(477.64):711.4

О. М. Фостащенко

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4287-2838>

Кафедра міського будівництва і архітектури

Запорізький національний університет, просп. Соборний, 226, Запоріжжя, Україна, 69006

О. Г. Добровольська

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1337-7216>

Кафедра міського будівництва і архітектури

Запорізький національний університет, просп. Соборний, 226, Запоріжжя, Україна, 69006

Д. О. Фостащенко

магістрант, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4572-8623>

Кафедра міського будівництва і архітектури

Запорізький національний університет, просп. Соборний, 226, Запоріжжя, Україна, 69006

*автор-кореспондент, e-mail: zdia2017@gmail.com

Впровадження нормативних, санітарно-технічних та ландшафтно-містобудівних заходів для відновлення малих річок Запорізького регіону

Цитувати як:

Фостащенко, О. М., Добровольська, О. Г., Фостащенко, Д. О. (2025). Впровадження нормативних, санітарно-технічних та ландшафтно-містобудівних заходів для відновлення малих річок Запорізького регіону. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 23, 381-394. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-33](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-33)

© 2025, Фостащенко, О. М., Добровольська, О. Г., Фостащенко, Д. О.

Анотація. У статті наведено ключові аспекти впровадження нормативних, санітарно-технічних та ландшафтно-містобудівних заходів, спрямованих на відновлення малих річок Запорізького регіону. Наголошується на важливості комплексного підходу до реабілітації водних об'єктів, що включає розробку і реалізацію відповідних правових та технічних механізмів, очищення русел і прибережних територій, а також інтеграцію екосистем у міське середовище.

Для запобігання забрудненню вод малих річок Запорізької області поверхневими стоками необхідно створити водоохоронні зони, чітко визначити та закрити на місцевості прибережні захисні смуги, встановити відповідні водоохоронні знаки на територіях водного фонду, підтримувати належний санітарний стан у цих зонах та здійснити благоустрій прибережних територій. Модернізація систем водовідведення сприятиме зниженню рівня забруднення, що надходить як від точкових, так і від дифузних джерел, зокрема із поверхневих потоків. Пропонуються ефективні рішення з благоустрою прилеглих зон, які передбачають функціональне зонування, створення рекреаційних просторів та підвищення екологічної стійкості річкових басейнів. З метою оптимізації регулювання водотоків слід здійснити інвентаризацію гідротехнічних споруд на

малих річках, визначивши їхніх власників та перевіривши законність їхнього зведення. Гідроспоруди, які не мають власника, слід поставити на баланс органів місцевого самоврядування.

Окрема увага приділена необхідності освоєння басейнів малих річок Запорізької області та комплексному підходу до відновлення водних екосистем, що включає нормативно-методичні, організаційні, інженерні та ландшафтнo-містобудівні заходи. Зазначено, що впровадження таких заходів сприятиме покращенню якості довкілля, підвищенню рівня життя населення та формуванню сприятливого урбаністичного простору.

Ключові слова: відновлення малих річок, нормативні заходи, санітарно-технічні заходи, ревіталізація, міське середовище, очищення русел

Вступ

Малі річки є важливим компонентом водної екосистеми будь-якого регіону, відіграють ключову роль у забезпеченні біорізноманіття, регулюванні водного режиму та підтримці якості водних ресурсів. Запорізький регіон, як територія з переважно посушливим кліматом, має особливу потребу у збереженні та відновленні малих річок. В останні десятиліття антропогенний вплив, кліматичні зміни та недостатнє екологічне управління призвели до значного погіршення стану малих річок Запорізького регіону.

Територією Запорізької області протікає 65 річок, серед яких виділяються 3 середні та 62 малі річки. Середні річки забезпечують більшу частину водних ресурсів регіону, тоді як малі річки відіграють важливу роль у підтримці місцевих екосистем, забезпеченні зрошення та водопостачання.

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Стратегії відновлення почалися обговорюватись на світових самітах, симпозіумах конференціях експертів від початку воєнних дій в Україні. Кожного дня в результаті обстрілів руйнується інфраструктура міст та населених пунктів. На сьогодні експерти можуть назвати лише приблизну величину збитків від нанесених руйнувань. Аналіз всіх аспектів цієї проблеми має велике значення для забезпечення умов відбудови та подальшого сталого розвитку країни. Найбільша кількість руйнувань була завдана Донецькій, Харківській, Луганській, Херсонській, Миколаївській та Запорізькій областям. Значна шкода була нанесена докiллю України [1]. Особливо ця проблема стосується малих річок, зниження якості води в яких виникає через випуск стічних вод, які не пройшли повне або достатнє очищення, накопичення сміття, що утворюється в домашньому господарстві, а також неправомірної експлуатації природних запасів на водозабірних інженерних об'єктах та порушення водоохоронних норм.

Вчений Олександр Рильський зазначає, що основними факторами, які спричиняють зникнення річок, є будівництво дамб і гребель, а також порушення правил господарської діяльності в прибережних захисних зонах

[2]. Експерт зазначає, що за останні два десятиліття в Україні зникло понад десять тисяч малих річок. Основною причиною він називає соціально-політичні фактори: розорювання берегів, вирубування лісів та лісосмуг. Крім того, з малих річок неконтрольовано забирають воду для зрошення, а на них зведено десятки гребель. Тільки на річці Мокра Московка зведено 37 гребель. Це призводить до збільшення площі випаровування, зменшення водотоку та об'єму води, яка могла б потрапити в Дніпро чи Азовське море. Крім того, підвищується температура води, оскільки стоячі води нагріваються швидше. До цього додається і масове буріння артезіанських свердловин.

Юрій Карпенко вважає, що пересихання малих річок спричинене зменшенням рівня ґрунтових вод та скороченням живлення водозбірних площ [3].

Малі річки мають велике значення для екологічних систем, забезпечують водою рослинність, тварин та людей. Ці водні артерії служать життєво важливими природними шляхами для навколишніх територій. Тому слід проаналізувати основні причини забруднення малих річок, наслідки та можливі варіанти розв'язання проблеми.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є впровадження нормативних, санітарно-технічних та ландшафтно-містобудівних заходів для відновлення малих річок на прикладі Запорізького регіону.

Відповідно до програми ревіталізації малих річок [4] необхідно проводити дослідження їх екологічного стану, за результатами якого визначити екологічний стан та розробити оптимальні заходи стосовно відновлення річок.

Ці завдання корелюють з концепціями відновлення України, які стосуються будівництва та модернізації міст [5], зокрема стосовно покращення теперішнього стану системи централізованого водовідведення, який негативно впливає на екологічну безпеку навколишнього середовища.

Трансформація міст в рамках моделі зеленого повоєнного відновлення України [6] передбачає впровадження «стратегії «нуль забруднення», включаючи нуль відходів, для міст після завершення війни». Екологічна безпека також спрямована на розвиток «циркулярної економіки» що співпадає з Європейським Зеленим Курсом та передбачає відбудову інфраструктури управління відходами [7].

Більшість річкових ландшафтів під впливом антропогенної діяльності змінюються та руйнуються. Спостерігається комплексне забруднення ландшафтів, яке включає механічні, теплові, шумові, електромагнітні, хімічні та біотичні впливи. Одним із найважливіших завдань сьогодення є відбудова інфраструктури та охорона водних об'єктів. Тому головною метою цієї статті є аналіз законодавчих аспектів, комплексних заходів, які можуть сприяти впровадженню практичних заходів для охорони малих річок.

Матеріали та методи

На території Запорізької області протікає 62 малі річки, більшість з яких є притоками Дніпра та Молочної. Вони відіграють важливу роль у зрошенні, забезпеченні водними ресурсами для сільського господарства та підтриманні екосистем регіону. З урахуванням кліматичних умов, літологічної будови та рельєфу на суходолі сформувалася величезна кількість річок, які живляться з водозбірних басейнів. Саме з цих басейнів здійснюється природний стік води. Залежно від площі водозбору, річки класифікуються на великі, середні та малі [8].

Багато з цих річок мають сезонний характер і наповнюються водою переважно під час весняного танення снігу та дощів [9].

Середні річки області зазвичай мають більш постійний водний режим і більшу водність, тоді як малі річки здебільшого залежать від сезонних опадів. Унаслідок кліматичних змін та господарської діяльності частина малих річок піддається замуленню, пересиханню, а їх екологічний стан поступово погіршується. Збереження водних ресурсів цих річок є важливим завданням для екологічної стабільності регіону.

Загальна протяжність малих річок у Запорізькій області становить 2189,7 км [10].

Значний промисловий потенціал Запорізької області неминуче спричиняє забруднення водних об'єктів через скиди забруднювальних речовин зі стічними водами промислових підприємств та об'єктів житлово-комунального господарства. Це створює загрозу для екосистем, погіршує якість води та вимагає впровадження ефективних технологій очищення стоків, посилення екологічного контролю та дотримання стандартів екологічної безпеки.

Обсяги скидів забруднених зворотних вод безпосередньо залежать від масштабів виробничої діяльності основних підприємств-забруднювачів водних об'єктів. Насамперед це стосується ВП «Запорізька ТЕС» ПАТ «ДТЕК Дніпроенерго» та ПАТ «Запорізький металургійний комбінат «Запоріжсталь». Збільшення обсягів виробництва на цих підприємствах призводить до зростання кількості стічних вод, що вимагає підвищення ефективності систем очищення, контролю за дотриманням екологічних норм та реалізації заходів для зменшення негативного впливу на навколишнє середовище.

Порушення гідрологічного та гідрохімічного режимів малих річок регіону залишається серйозною екологічною проблемою. За результатами паспортизації, сучасний стан малих і середніх річок області оцінюється за більшістю показників як незадовільний і протягом останніх років не демонструє помітного покращення. Основною причиною такого стану є надмірний антропогенний вплив на екосистеми малих річок, які дуже чутливі до будь-яких зовнішніх втручань. За винятком великих міст, таких як Запоріжжя, Бердянськ, Василівка, Енергодар і Кам'янка-Дніпровська,

господарсько-побутові стічні води з інших населених пунктів області переважно скидаються в малі та середні річки, що погіршує їх екологічний стан [11].

На території Запорізької області виділяють дві основні групи річок:

– Північна група річок Придніпров'я включає притоки річки Вовча (Гайчур, Велика Терса), річки Конка, Янчекрак, Карачекрак, Велика Білозерка та інші. Загалом до цієї групи належать 25 річок.

– Південна група річок Приазов'я складається з річок Великий та Малий Утлюк, Молочна, Берда, Обіточна, Лозоватка, Джебельня, Домузла, Корсак та інших. Усього до цієї групи належать 40 річок.

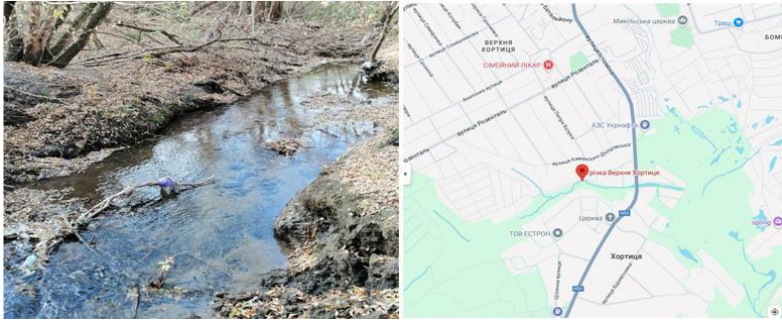
Зменшення кількості та інтенсивності опадів упродовж останніх років, підвищення середньорічних температур, зниження рівня ґрунтових вод та процеси замулення значно погіршили водозабезпечення малих річок. У період межені – період найнижчого рівня води, більшість річок пересихають у своїх верхів'ях, а окремі з них повністю втрачають водний потік, перетворюючись на сухі річища. Такі зміни негативно впливають на екосистеми річок, сприяють деградації біорізноманіття, а також ускладнюють використання річок для потреб місцевого населення та сільського господарства.

Тому надзвичайно важливо впроваджувати спеціальні комплексні заходи для їх збереження, спрямовані на запобігання зменшенню водності, забрудненню та пересиханню.

Ерозійні процеси на водозборі, як природного походження, так і спричинені сільськогосподарським освоєнням схилів долин та балок, призводять до інтенсивного змиву ґрунту [12]. Запорізька область належить до степових регіонів, які характеризуються неможливістю сезонного накопичення води та випарними процесами внаслідок вітрової інтенсивності та сонячної активності.

Особливість зазначеної регіональної специфіки чітко прослідковується на прикладі аналізу стану річки Березнуватої (рис. 1, а) – однієї з двох протоків річки Вєрхня Хортиця, яка розташована у правобережній частині Запоріжжя (рис. 1, б).

Ця річка є правою притокою Дніпра (частина басейну Чорного моря) та є однією з трьох річок Хортиця (разом із Середньою та Нижньою Хортицею), що впадають у Дніпро з правого берега, напроти острова Хортиця. Річка Березнувата перетинається двома магістралями, пропуск води під якими здійснюється через труби. Джерелом живлення, головним чином, є атмосферні опади (рис. 2, а) та підземні води (рис. 2, б), частково спостерігається незначне притокове живлення (рис. 2, в) з верхніх ділянок, що є особливістю великих та середніх річок.



а б
Рис. 1. Малі річки правобережної частини Запоріжжя



а б в
Рис. 2. Види живлення малих річок Запорізького регіону

Для малих річок пересихання та перехід до режиму підземного стоку є типовим явищем, що виникає через вододефіцит у меженний період і літні посухи та являє собою приклад балково-суходільного утворення з тимчасовим режимом водотоку. Серйозною проблемою для малих річок даного регіону є значне погіршення якості води, спричинене скиданням неочищених або недостатньо очищених стічних вод, побутового сміття (рис. 3, а), неефективним управлінням природними ресурсами на водозборах, а також масштабними порушеннями водоохоронного режиму (рис. 3, б).

За даними Агенції водних ресурсів [10], у Запорізькій області, на території якої протікає близько 62 малих річок, протягом останніх 30 років їх кількість не змінилась. З 2013 року у Запорізькій області реалізується Регіональна програма з розвитку водного господарства та екологічного відновлення басейну річки Дніпро, яка періодично переглядається та доповнюється, з 2018 року втілюється Програма ревіталізації малих річок та інших водойм міста Запоріжжя на 2018-2028 роки. Малі річки, як водні

місцевого самоврядування всіх рівнів – від сільських і селищних до міських, районних і обласних рад – мають ініціювати та впроваджувати регіональні програми, спрямовані на екологічне відновлення малих водотоків, враховуючи їхні особливості, а також інтегрувати специфіку управління цими водними об'єктами під час планування та реалізації будь-якої господарської діяльності.

Комплексні заходи зі збереження водності річок, а також їх охорони від забруднення та засмічення покладаються на водокористувачів і землекористувачів, чий землі розташовані в межах річкових басейнів.

Однак у нинішніх умовах ведення господарської діяльності зазначені обмеження часто ігноруються. Відповідно до положень [16], усі водні ресурси (включаючи водні об'єкти) належать до виключної власності народу України та можуть надаватися лише у користування. Право власності на водні об'єкти український народ реалізує через Верховну Раду України та органи місцевого самоврядування.

Законодавче рішення, прийняте в Україні [17], стало поштовхом до відновлення малих водотоків. Упровадження управлінської стратегії на основі басейнового поділу та розробка планів заходів для управління малими річками довжиною від 4 км створюють передумови для їх збереження та охорони. Це, у свою чергу, сприятиме покращенню стану водного господарства України.

Урядовий документ [18] встановлює визначення плану управління річковим басейном як інструмента для досягнення екологічних цілей, що визначені для кожного річкового району у межах заданого часових рамок.

Основним екологічним завданням для всіх річкових басейнів є досягнення або збереження належного стану поверхневих і підземних водних масивів, а також відповідного екологічного потенціалу для антропогенно змінених чи штучно створених водойм. У пояснювальних документах до закону [17] наголошено на необхідності впровадження інтегрованого управління водними ресурсами відповідно до європейських стандартів, зокрема Директиви 2000/60/ЄС [18].

Необхідність створення Програми [2] виникла внаслідок складної ситуації, що склалася з водним режимом, екологічним станом і просторовою організацією ландшафтів у районах малих річок. Програма має на меті розв'язання проблеми відновлення водних екосистем малих річок.

Для захисту вод малих річок Запорізької області від забруднення поверхневими стоками необхідно облаштувати водоохоронні зони та визначити на місцевості прибережні захисні смуги малих водотоків, встановити інформаційно-охоронні знаки на територіях, що належать до водного фонду, забезпечити відповідний санітарний порядок у водоохоронних зонах і впорядкувати прибережні території.

Недотримання належного санітарного режиму в прибережних зонах призводить до забруднення поверхневого стоку, що потрапляє до річкових систем, викликаючи зниження якості води, замулення русел і проблеми під час високої води.

Береги малих річок зазнають руйнівного впливу природних процесів, таких як дощі та надмірні водопілля, які спричиняють накопичення намулу на дні водойм унаслідок зсувів і потрапляння ґрунтової маси у водне середовище.

Використання рослин, що мають сильну кореневу систему й витримують періодичне затоплення, для укріплення берегів є природоорієнтованим і безпечним способом стабілізації берегової зони.

Покращити гідрологічний режим малих річок можна шляхом розчищення їхніх річищ, оптимізації зарегульованості водотоків, а також приведення джерел у належний санітарний стан і благоустрій.

Розчищення річищ водотоків має здійснюватися у двох напрямках. Перший передбачає видалення сміття, повалених дерев, гілок, надмірної рослинності тощо. Ці заходи є маловитратними та повинні виконуватися щороку, особливо після повеней. Другий напрямок включає розчищення сильно замулених річищ із видаленням накопиченого мулу. Для цього потрібна розробка проєктної документації та певні фінансові витрати.

Для оптимізації зарегульованості водотоків необхідно провести інвентаризацію гідротехнічних споруд на малих річках, визначити їх власників та оцінити законність їх створення. Гідроспоруди без власника слід передати на баланс органів місцевої влади

Забезпечення належного санітарно-гігієнічного стану джерел та здійснення комплексу заходів з їх упорядкування є важливою складовою у системі попередження деградації водного середовища малих річок.

Для зниження впливу зворотних вод на малі річки та інші водойми необхідно здійснювати будівництво та оновлення інженерної інфраструктури, призначені для очищення стічних вод та відведення надлишкової вологи, а також впорядкувати систему дренажу атмосферних опадів з урбанізованих територій, що спричиняють погіршення екологічного стану водних об'єктів малих річок.

Удосконалення інфраструктури водовідведення стічних вод сприятиме зниженню рівня надходження забруднювальних речовин як із локалізованих, так і з розсіяних джерел, зокрема через поверхневий стік. Дифузні джерела забруднення, такі як стік талих, дощових та дренажних вод з урбанізованих територій, можуть бути частково впорядковані та очищені шляхом облаштування систем зливого водовідведення.

Серед важливих завдань є виявлення та припинення несанкціонованих скидів забруднених вод, а також ліквідація сміттєзвалищ у прибережних зонах.

Для підвищення обізнаності населення щодо екологічного значення малих річок необхідно випускати інформаційно-просвітницькі матеріали, розробляти освітні програми з вивчення малих річок, а також облаштовувати зони рекреації та відпочинку.

Висновки

1. Відновлення малих річок Запорізького регіону потребує впровадження цілісного комплексу нормативних, санітарно-технічних та ландшафтно-містобудівних заходів, що забезпечують ефективну реабілітацію водних об'єктів.

2. Комплексний підхід до реорганізації річкових басейнів включає правове регулювання, інженерні роботи, екологічну інтеграцію та благоустрій прибережних зон.

3. Важливим завданням є розробка схем рекреаційного освоєння, що дозволить збалансовано використовувати водні ресурси з урахуванням екологічної стійкості й потреб місцевого населення.

4. Запропоновані заходи сприятимуть покращенню екологічної ситуації, формуванню комфортного міського середовища та підвищенню якості життя громадян. Доступність водойм для громадян як рекреаційних ресурсів є важливим показником сталого розвитку міського середовища.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. Anhurets O., Khazan P., Kolesnykova K., Kushch M., Chernokhova M., Havranek M. (2022). Ukraine, shkola dovkilliu, ekolohichni naslidky viiny. 84. <https://cleanair.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/cleanair.org.ua-war-damages-ua-version-04-low-res.pdf>
2. Astafiev D. Chomu miliut mali richky na Zaporizhzhzi, ta shcho z tsym robyty. Vidpovidaie vchenyi. Suspilne Zaporizhzhzia. (25.09.2021). <http://surl.li/nqogbp/>

3. Prychyny peresykhannia malykh richok. Dumky ekspertiv. Menshchyna. (17.09.2019). <http://surl.li/akyzvz>
4. Zaporizka miska rada (2018). Prohrama revitalizatsii malykh richok ta inshykh vodoim mista Zaporizhzhia na 2018-2028 roky. https://zp.gov.ua/upload/content/o_1cmi9oc101f9nq071gnsgmo1v0e5a.pdf
5. Kabinet Ministriv Ukrainy (2022). Proiekt planu vidnovlennia Ukrainy: Budivnytstvo, mistobuduvannia, modernizatsiia mist ta rehioniv Ukrainy : materialy robochoi hrupy. 182. <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/recoveryrada/ua/construction-urban-planning-modernization-of-cities-and-regions.pdf>
6. Zelene povoiennie vidnovlennia Ukrainy: vizii ta modeli. Analitychna zapyska (2022). Kyiv: Resursno-analitchnyi tsentr «Suspilstvo i dovkillia», 28. https://dixigroup.org/wp-content/uploads/2022/08/green_recovery.pdf
7. Kabinet Ministriv Ukrainy (2022). Proiekt planu vidnovlennia Ukrainy: materialy robochoi hrupy «Ekolohichna bezpeka», 11. <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/recoveryrada/ua/environmental-safety-assembly.pdf>
8. Vodnyi kodeks Ukrainy, Stattia 79. Kodeks Ukrainy № 213/95-VR (1995) (Ukraina). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-vr#Text>
9. Vodni resursy. Baseinove upravlinnia vodnykh resursiv richok Pryazovia. <https://buvrzp.gov.ua/vodni-resursy/>
10. Astafiev D. (2021). Za 30 rokov u Zaporizkii oblasti ne peresokhla zhodna z malykh richok. Suspilne Zaporizhzhia. <https://suspilne.media/zaporizhzhia/165718-za-30-rokiv-u-zaporizkij-oblasti-ne-peresokhla-zodna-z-malih-ricok-agentstvo-vodnih-resursiv/>
11. Ekolohichniy pasport Zaporizkoi oblasti. (2024). <https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamky/ekologichniy-monitoring/ekologichni-pasporty/>
12. Mats D.A., Sevastianov Yu. H. (2018). Vodnyi fond Mykolaivskoi oblasti. (3-tie vyd.). <https://mkvodres.davr.gov.ua/sites/default/files/%D0%92%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%B8%D0%B9%20%20%D1%84%D0%BE%D0%BD%D0%B4%20.pdf>
13. Pro zatverdzhennia Hihiiienichnykh normatyviv yakosti vody vodnykh ob'ektiv dlia zadovolennia pytnykh, hospodarsko-pobutovykh ta inshykh potreb naselennia. Nakaz №721 (2022) (Ukraina). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0524-22#Text>
14. Vodnyi kodeks Ukrainy, Stattia 80. Kodeks Ukrainy № 213/95-VR (1995) (Ukraina). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-vr#Text>
15. Pro zatverdzhennia Zahalnodержавnoi tsilovoi prohramy rozvytku vodnoho hospodarstva ta ekolohichnoho ozdorovlennia baseinu richky Dnipro na period do 2021 roku, Zakon Ukrainy 4836-VI (2012) (Ukraina). <https://faolex.fao.org/docs/pdf/ukr179484.pdf>
16. Vodnyi kodeks Ukrainy, Stattia 6. Kodeks Ukrainy № 213/95-VR (1995) (Ukraina). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-vr#Text>
17. Pro vnesennia zmin do deiakykh zakonodavchykh aktiv Ukrainy shchodo vprovadzhennia intehrovanykh pidkhodiv v upravlinnia vodnymy resursamy za baseinovym pryntsygom, Zakon Ukrainy №1641-VIII (2016) (Ukraina). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1641-19#Text>
18. Dyrektyva 2000/60/IEs Yevropeiskoho Parlamentu i Rady «Pro vstanovlennia ramok diialnosti Spivtovarystva u haluzi vodnoi polityky» vid 23 zhovtnia 2000 roku. Dyrektyva №2000/60/IEs (2000). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_962#Text

Література

1. Ангурець О., Хазан П., Колесникова К., Куш М., Чернохова М., Гавранек М. (2022). Україна, шкода довкіллю, екологічні наслідки війни. 84. <https://cleanair.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/cleanair.org.ua-war-damages-ua-version-04-low-res.pdf>
2. Астаф'єв Д. Чому міліють малі річки на Запоріжжі, та що з цим робити. Відповідає вчений. *Суспільне Запоріжжя*. (25.09.2021). <http://surl.li/nqogbp/>
3. Причини пересихання малих річок. Думки експертів. *Менщина*. (17.09.2019). <http://surl.li/akyzvo>
4. Запорізька міська рада (2018). Програма ревіталізації малих річок та інших водойм міста Запоріжжя на 2018-2028 роки. https://zp.gov.ua/upload/content/o_1cmi9oc101f9nq071gnsgmo1v0e5a.pdf
5. Кабінет Міністрів України (2022). Проєкт плану відновлення України: Будівництво, містобудування, модернізація міст та регіонів України : матеріали робочої групи. 182. <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/recoveryrada/ua/construction-urban-planning-modernization-of-cities-and-regions.pdf>
6. Зелене повоєнне відновлення України: візія та моделі. Аналітична записка (2022). Київ: Ресурсно-аналітичний центр «Суспільство і довкілля», 28. https://dixigroup.org/wp-content/uploads/2022/08/green_recovery.pdf
7. Кабінет Міністрів України (2022). Проєкт плану відновлення України: Матеріали робочої групи «Екологічна безпека», 11. <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/recoveryrada/ua/environmental-safety-assembly.pdf>
8. Водний кодекс України, Стаття 79. Кодекс України № 213/95-ВР (1995) (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-вр#Text>
9. Водні ресурси. *Басейнове управління водних ресурсів річок Приазов'я*. <https://buvrzp.gov.ua/водні-ресурси/>
10. Астаф'єв Д. (2021). За 30 років у Запорізькій області не пересохла жодна з малих річок. *Суспільне Запоріжжя*. <https://suspilne.media/zaporizhzhia/165718-za-30-rokiv-u-zaporizkij-oblasti-ne-peresohla-zodna-z-malih-ricok-agentstvo-vodnih-resursiv/>
11. Екологічний паспорт Запорізької області. (2024). <https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamky/ekologichnyj-monitoryng/ekologichni-pasporty/>
12. Мац Д.А., Севастьянов Ю. Г. (2018). *Водний фонд Миколаївської області*. (3-тє вид.). <https://mkvodres.davr.gov.ua/sites/default/files/%D0%92%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%B8%D0%B9%20%20%D1%84%D0%BE%D0%BD%D0%B4%20.pdf>
13. Про затвердження Гігієнічних нормативів якості води водних об'єктів для задоволення питних, господарсько-побутових та інших потреб населення. Наказ №721 (2022) (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0524-22#Text>
14. Водний кодекс України, Стаття 80. Кодекс України № 213/95-ВР (1995) (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-вр#Text>

15. Про затвердження Загальнодержавної цільової програми розвитку водного господарства та екологічного оздоровлення басейну річки Дніпро на період до 2021 року, Закон України 4836-VI (2012) (Україна). <https://faolex.fao.org/docs/pdf/ukr179484.pdf>

16. Водний кодекс України, Стаття 6. Кодекс України № 213/95-ВР (1995) (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-вр#Text>

17. Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо впровадження інтегрованих підходів в управління водними ресурсами за басейновим принципом, Закон України №1641-VIII (2016) (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1641-19#Text>

18. Директива 2000/60/ЄС Європейського Парламенту і Ради «Про встановлення рамок діяльності Співтовариства у галузі водної політики» від 23 жовтня 2000 року. Директива №2000/60/ЄС (2000). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_962#Text

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 12.05.2025	Received 12.05.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 04.06.2025	Received in revised form 04.06.2025
Прийнято 04.06.2025	Accepted 04.06.2025
Опубліковано 25.06.2025	Published 25.06.2025

O. M. Fostashchenko

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4287-2838>
Department of Urban Planning and Architecture
Zaporizhzhya National University, Zaporizhzhia, 226 Sobornyi Avenue, Ukraine, 69006

O. G. Dobrovol'ska

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1337-7216>
Department of Urban Planning and Architecture
Zaporizhzhya National University, Zaporizhzhia, 226 Sobornyi Avenue, Ukraine, 69006

D. O. Fostashchenko

M.Sc. in Engineering, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4572-8623>
Department of Urban Planning and Architecture
Zaporizhzhya National University, Zaporizhzhia, 226 Sobornyi Avenue, Ukraine, 69006

*corresponding author, e-mail: zdia2017@gmail.com

Implementation of regulatory, sanitary-technical, and landscape-urban planning measures for the restoration of small rivers in the Zaporizhzhia region

How to Cite:

Fostashchenko, O. M., Dobrovol'ska, O. G., Fostashchenko, D. O. (2025). Implementation of regulatory, sanitary-technical and landscape-urban planning measures for the restoration of small rivers of the Zaporizhzhia region. Modern technologies and calculation methods in construction, 23, 381-394. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-35](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-35)

Abstract. The article presents key aspects of the implementation of regulatory, sanitary-technical, and landscape and urban planning measures aimed at the restoration of small rivers of the Zaporizhia region. The importance of a comprehensive approach to the rehabilitation of water bodies is emphasized, which includes the development and implementation of appropriate legal and technical mechanisms, the cleaning of riverbeds and coastal areas, as well as the integration of ecosystems into the urban environment.

To prevent pollution of small river waters of Zaporizhia region by surface runoff, it is necessary to create water protection zones, clearly define and fix coastal protective strips on the ground, install appropriate water protection signs on the territories of the water fund, maintain proper sanitary conditions in these zones, and carry out improvement of coastal areas. Modernizing wastewater systems will help reduce pollution levels from both point and diffuse sources, including surface runoff. Effective solutions are proposed for the improvement of adjacent areas, which include functional zoning, the creation of recreational spaces and increasing the ecological sustainability of river basins. In order to optimize the regulation of water flows, an inventory of hydraulic structures on small rivers should be carried out, their owners identified and the legality of their construction verified. Hydropower plants that do not have an owner should be placed on the balance sheet of local governments.

Special attention is paid to the need to develop the basins of small rivers of the Zaporizhia region and to a comprehensive approach to the restoration of aquatic ecosystems, which includes regulatory, methodological, organizational, engineering, and landscape and urban planning measures. It is noted that the implementation of such measures will contribute to improving the quality of the environment, raising the standard of living of the population, and forming a favorable urban space.

Keywords: restoration of small rivers, regulatory measures, sanitary and technical measures, revitalization, urban environment, channel cleaning.

УДК 539.3

О. С. Чапюк*

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0283-1863>

Кафедра будівництва та цивільної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

О. О. Гомон

старший лаборант

Кафедра будівництва та цивільної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

О. В. Петренко

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8870-8534>

Кафедра будівельного виробництва

Національний університет «Львівська Політехніка», вул. Степана Бандери, 12, Львів, Україна, 79013

*автор-кореспондент, e-mail: ochapiuk1983@gmail.com

Особливості роботи модифікованої епоксидною смолою деревини хвойних порід

Цитувати як:

Чапюк, О.С., Гомон, О.О., Петренко, О.В. (2025). Особливості роботи модифікованої епоксидною смолою деревини хвойних порід. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 23, 395-402. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-34](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-34)

© 2025, О. С. Чапюк, О. О. Гомон, О. В. Петренко.

Анотація. У статті розглянуто удосконалення способів модифікації деревини епоксидною смолою, наведено результати проведення експериментальних досліджень модифікованих епоксидною смолою деревини сосни, модрина та ялини на стиск вздовж волокон, встановлено оцінку впливу даної полімерної композиції на міцність деревини та проаналізовано особливості характеру їх роботи. Фізико-механічні властивості необробленої деревини є мінливими і залежать від багатьох зовнішніх факторів. Для стабілізації даних показників застосовується модифікація деревини різними способами. Деревина, піддана модифікації, стає більш стійкою до агресивних чинників і міцнішою. Способи її обробки включають використання модифікаторів різного хімічного складу. Розглянуто переваги епоксидної смоли. Метою наших досліджень є удосконалення способів модифікації деревини епоксидною смолою, проведення експериментальних досліджень модифікованих епоксидною смолою деревини сосни, модрина та ялини на стиск вздовж волокон, оцінка впливу даної полімерної композиції на міцність деревини та особливості характеру їх роботи. Удосконалено способи модифікації деревини епоксидними смолами. Наведено методiku експериментальних натурних випробувань досліджуваних порід деревини. Встановлено особливості та характер роботи

модифікованої та немодифікованої деревини хвойних порід: сосни, модрина, ялини. Отримано нові експериментальні дані, що стосується модифікованих епоксидною смолою зразків деревини на стиск вздовж волокон щодо її міцнісних характеристик. Після проведення натурних експериментів було визначено міцність модифікованої та немодифікованої досліджуваних хвойних порід деревини. Встановлено, що міцність деревини після модифікації автоклавним способом збільшилась для призм деревини сосни в 1,29 рази, модрина – в 1,21 рази, ялини в 1,36 рази.

Ключові слова: модифікована деревина, процес модифікації, міцність, епоксидна смола, стиск.

Вступ

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Деревина залишається одним із найбільш затребуваних матеріалів, без якого важко уявити багато галузей української та світової економік [1,2]. Фізико-механічні властивості необробленої деревини є мінливими і залежать від багатьох зовнішніх факторів. Для стабілізації даних показників застосовується модифікація деревини різними способами [3-5]. З іншої сторони певні способи модифікації можуть підвищити її міцнісні властивості, що дає можливість значно розширити область її застосування. Деревина, піддана модифікації, стає більш стійкою до агресивних чинників [3,4] і міцнішою. Способи її обробки включають використання модифікаторів різного хімічного складу. Цікавою полімерною композицією є епоксидна смола [6,7], характеристики якої вивчені досить широко. Але практично невідомо вплив епоксидної смоли на фізико-властивості деревини.

Мета і завдання дослідження. Метою наших досліджень є удосконалення способів модифікації деревини епоксидною смолою, проведення експериментальних досліджень модифікованих епоксидною смолою деревини сосни, модрина та ялини на стиск вздовж волокон, оцінка впливу даної полімерної композиції на міцність деревини та особливості характеру їх роботи.

Матеріали та методи

На деревообробному підприємстві було виготовлено зразки у формі призм розміром $30 \times 30 \times 120$ мм з вологістю 12% без видимих дефектів [8-10] (Рис.1).

У цьому дослідженні для модифікації деревини застосовували двокомпонентну епоксидну смолу [1]. Обробці піддавали зразки деревини хвойних порід, зокрема сосни, модрина та ялини.

Процедуру просочення епоксидною смолою здійснювали в автоклаві за тиску 2 атм упродовж однієї години. Після вилучення з автоклава зразки поміщали в сушильну камеру, де вони перебували протягом 2 годин при температурі 50 °С для забезпечення повного затвердіння смоли (Рис. 2).

Випробування модифікованих та немодифікованих зразків на стиск уздовж волокон проводили одноразовим короточасним навантаженням за допомогою сервогідравлічного преса STM-100 [11,12].

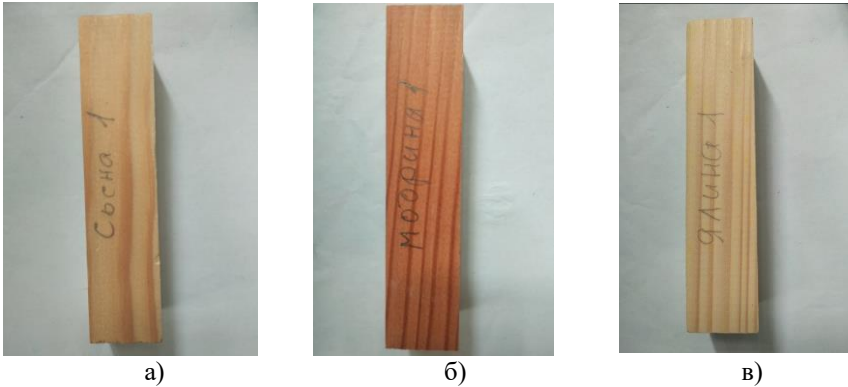


Рис.1. Зразки необробленої деревини вологістю 12%:
а) сосни; б) модрини; в) ялини

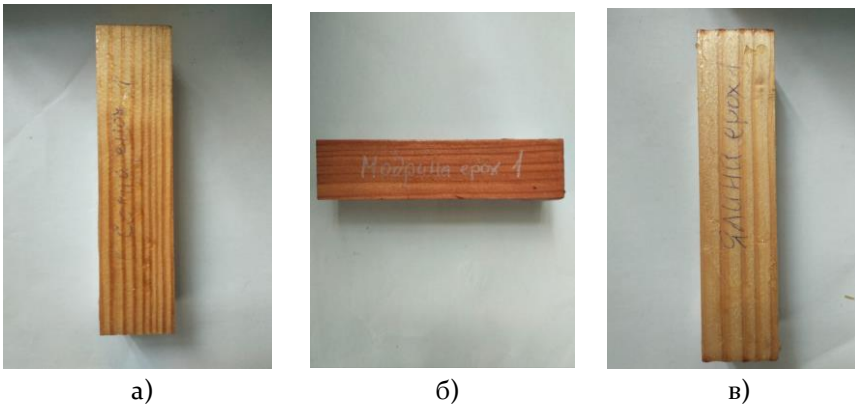


Рис. 2. Модифіковані епоксидною смолою зразки деревини:
а) сосни; б) модрини; в) ялини

Результати та обговорення

За результатами натурних випробувань було встановлено особливості та характер роботи модифікованої та немодифікованої деревини хвойних порід: сосни, модрини, ялини.

Зокрема, на рис.3 наведено зразки необробленої деревини вологістю 12% після випробувань. З рис.3 видно, що необроблені випробувані призми руйнуються по-різному.

На рис.4 зображено модифіковані епоксидною смолою зразки деревини після випробувань.



а)



б)



в)

Рис.3. Зразки необробленої деревини вологістю 12% після випробувань: а) сосни; б) модрина; в) ялини



а)



б)



в)

Рис.4. Модифіковані епоксидною смолою зразки деревини після випробувань: а) сосни; б) модрина; в) ялини

Аналізуючи рис.4 приходимо до висновку, що модифіковані зразки деревини сосни та модрина характер руйнування є досить схожим, а деревини ялини має дещо інший характер.

Після проведення натурних експериментів було визначено міцність модифікованої та немодифікованої досліджуваних хвойних порід деревини. Отже, міцність необроблених зразків була наступною: деревини сосни – 45,7 МПа, модрини – 59,6 МПа, ялини – 40,2 МПа. Модифікованих епоксидною смолою: сосни – 59,1 МПа, модрини – 72,0 МПа, ялини – 54,8 МПа. Отже, міцність деревини після модифікації автоклавним способом збільшилась для призм деревини сосни в 1,29 рази, модрини – в 1,21 рази, ялини в 1,36 рази.

Висновки

1. Удосконалено способи модифікації деревини хвойних порід епоксидними смолами.
2. Наведено методику експериментальних досліджень.
3. Встановлено особливості та характер роботи модифікованої та немодифікованої деревини хвойних порід: сосни, модрини, ялини.
4. Отримано нові експериментальні дані, що стосується модифікованих епоксидною смолою зразків деревини на стиск вздовж волокон щодо її міцнісних характеристик.
5. Встановлено, що міцність деревини після модифікації автоклавним способом збільшилась для призм деревини сосни в 1,29 рази, модрини – в 1,21 рази, ялини в 1,36 рази.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. Homon O.O., Chapyuk O.S., Savchuk S.M. (2024). Vykorystannya kleyenoyi derevyny u promyslovishti. Suchasni tekhnolohiyi ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi, 22, 15–22. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-12\(22\)-03](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-12(22)-03).
2. Homon O.O., Chapyuk O.S., Savchuk S.M. Osoblyvosti zastosuvannya kleyenoyi derevyny. Inovatsiyni protsesy v haluzi dorozhn'oho budivnytstva: zbirnyk tez

dopovidey II mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi internet-konferentsiyi molodykh uchenykh ta studentiv, 6 lystopada 2024 roku, m. Luts'k. Luts'k: LNTU, 2024. S. 26-27.

3. Hill, C. (2011). Wood modification: An update. *BioResources*, 6 (2), Pp. 918–919. DOI:[10.15376/biores.6.2.918-919](https://doi.org/10.15376/biores.6.2.918-919).

4. Sandberg D., Kutnar A., Mantanis G. (2017). Wood modification technologies - a review. *iForest - Biogeosciences and Forestry*. 10(6), 895-908. DOI:[10.3832/ifer2380-010](https://doi.org/10.3832/ifer2380-010).

5. Peretyatko B., Havrylko O., Bilins'kyy B. (2019). Analiz tekhnolohichnykh skhem prosochennya derevyny u avtoklavnykh pechakh. Visnyk Natsional'noho universytetu "L'vivs'ka politehnika". Seriya: Teoriya i praktyka budivnytstva, 912, 139–145.

6. Kashytskyi V. P., Sadova O. L., Melnychuk M. D., Golodyuk G. I., Klymovets O. B. (2023). Structuring of modified epoxy composite materials by infrared spectroscopy. *Journal of Engineering Sciences*, Vol. 10(1), pp. 9-16. DOI: [10.21272/jes.2023.10\(1\).c2](https://doi.org/10.21272/jes.2023.10(1).c2).

7. Buketov, A., Stukhlyak, P., Maruschak, P., Panin, S., Menou, A. (2016). Physical and chemical aspects of the formation of epoxy composite material with microfilling agent. *Physical Key Engineering Material*. 712, 143-148. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.712.143>.

8. DSTU 4922:2008. Lisomaterialy ta pyloproduktsiya. Metody vyznachennya volohosti. Kyiv: Minrehion Ukrainy, 2009. 11 s.

9. DSTU EN 336–2003. Pylomaterialy konstruktsiyni iz khvoynykh porid ta topoli. Rozmiry. Dopustymy vidkhyleniya. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 2004. 8 s.

10. DSTU EN 518–2003. Lisomaterialy konstruktsiyni. Sortuvannya. Vymohy do standartiv na vizual'ne sortuvannya za mitsnistyu. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 2004. 9 s.

11. DSTU EN 380-2008. Lisomaterialy konstruktsiyni. Zahal'ni nastanovy shchodo metodiv vyprobuvannya na statychne navantazhennya. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 2010. 8s.

12. DSTU 3129:2015. Derevyna. Metody vidboru zrazkiv i zahal'ni vymohy do fizyko-mekhanichnykh vyprobuvan' nevelykykh bezdefektnykh zrazkiv. Kyiv: Minrehion Ukrainy, 2016. 9 s.

Література

1. Гомон О.О., Чапук О.С., Савчук С.М. (2024). Використання клеєної деревини у промисловості. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 22, 15–22. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-12\(22\)-03](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-12(22)-03).

2. Гомон О.О., Чапук О.С., Савчук С.М. Особливості застосування клеєної деревини. Іноваційні процеси в галузі дорожнього будівництва: збірник тез доповідей II міжнародної науково-практичної інтернет-конференції молодих учених та студентів, 6 листопада 2024 року, м. Луцьк. Луцьк: ЛНТУ, 2024. С. 26-27.

3. Hill, C. (2011). Wood modification: An update. *BioResources*, 6 (2), Pp. 918–919. DOI:[10.15376/biores.6.2.918-919](https://doi.org/10.15376/biores.6.2.918-919).
4. Sandberg D., Kutnar A., Mantanis G. (2017). Wood modification technologies - a review. *iForest - Biogeosciences and Forestry*. 10(6), 895-908. DOI:[10.3832/ifer2380-010](https://doi.org/10.3832/ifer2380-010).
5. Перетятко Б., Гаврилко О., Білінський Б. (2019). Аналіз технологічних схем просочення деревини у автоклавних печах. *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Серія: Теорія і практика будівництва*, 912, 139–145.
6. Kashytskyi V. P., Sadova O. L., Melnychuk M. D., Golodyuk G. I., Klymovets O. B. (2023). Structuring of modified epoxy composite materials by infrared spectroscopy. *Journal of Engineering Sciences*, Vol. 10(1), pp. 9-16. DOI: [10.21272/jes.2023.10\(1\).c2](https://doi.org/10.21272/jes.2023.10(1).c2).
7. Buketov, A., Stukhlyak, P., Maruschak, P., Panin, S., Menou, A. (2016). Physical and chemical aspects of the formation of epoxy composite material with microfilling agent. *Physical Key Engineering Material*. 712, 143-148. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.712.143>.
8. ДСТУ 4922:2008. Лісоматеріали та пилопродукція. Методи визначення вологості. Київ: Мінрегіон України, 2009. 11 с.
9. ДСТУ EN 336–2003. Піломатеріали конструкційні із хвойних порід та тополі. Розміри. Допустимі відхилення. Київ: Мінрегіонбуд України, 2004. 8 с.
10. ДСТУ EN 518–2003. Лісоматеріали конструкційні. Сорткування. Вимоги до стандартів на візуальне сорткування за міцністю. Київ: Мінрегіонбуд України, 2004. 9 с.
11. ДСТУ EN 380-2008. Лісоматеріали конструкційні. Загальні настанови щодо методів випробування на статичне навантаження. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 8с.
12. ДСТУ 3129:2015. Деревина. Методи відбору зразків і загальні вимоги до фізико-механічних випробувань невеликих бездефектних зразків. Київ: Мінрегіон України, 2016. 9 с.

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 28.05.2025	Received 28.05.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 28.05.2025	Received in revised form 28.05.2025
Прийнято 04.06.2025	Accepted 04.06.2025
Опубліковано 25.06.2025	Published 25.06.2025

O. S. Chapiuk*

PhD in Technical Sciences, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0283-1863>
Department of Building and Civil Engineering
Lutsk National Technical University, Lvivska 75, 43018 Lutsk, Ukraine

O. O. Homon

Senior laboratory assistant
Department of Building and Civil Engineering
Lutsk National Technical University, Lvivska 75, 43018 Lutsk, Ukraine

O. V. Petrenko

PhD in Technical Sciences, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8870-8534>
Department of Construction Production Technology
Lviv Polytechnic National University, S. Bandery 12, 79013, Lviv, Ukraine

*corresponding author, e-mail: ochapiuk1983@gmail.com

Features of working with epoxy resin-modified softwood

How to Cite:

Chapiuk, O. S., Homon, O. S., Petrenko, O. V. (2025). Features of working with epoxy resin-modified softwood. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 23, 395-402. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-34](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-34)

Abstract. The article considers the improvement of methods for modifying wood with epoxy resin, presents the results of experimental studies of epoxy resin-modified pine, larch, and spruce wood on compression along the fibers, assesses the impact of this polymer composition on the strength of wood, and analyzes the features of their work. The physical and mechanical properties of untreated wood are variable and depend on many external factors. To stabilize these indicators, wood modification is used in various ways. Modified wood becomes more resistant to aggressive factors and stronger. Methods of its processing include the use of modifiers of various chemical compositions. The advantages of epoxy resin are considered. The purpose of our research is to improve methods for modifying wood with epoxy resin, conduct experimental studies of epoxy resin-modified pine, larch, and spruce wood on compression along the fibers, and assess the impact of this polymer composition on the strength of wood and the features of its work. Methods of wood modification with epoxy resins have been improved. The methodology of experimental field tests of the studied wood species has been presented. The features and nature of the work of modified and unmodified coniferous wood: pine, larch, spruce have been established. New experimental data have been obtained regarding the strength characteristics of epoxy resin-modified wood samples in compression along the fibers. After conducting field experiments, the strength of modified and unmodified coniferous wood under study was determined. Strength of epoxy resin-modified wood samples: pine – 59.1 MPa, larch – 72.0 MPa, spruce – 54.8 MPa. It was established that the strength of wood after modification by the autoclave method increased for pine wood prisms by 1.29 times, larch by 1.21 times, and spruce by 1.36 times.

Keywords: modified wood, modification process, strength, epoxy resin, compression.

УДК 625.7

О.П. Шимчук*

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0564-2673>

Кафедра будівництва та цивільної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, м. Луцьк, Україна, 43018

О.В. Процюк

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2644-9490>

Кафедра будівництва та цивільної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, м. Луцьк, Україна, 43018

Л.О. Талах

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4643-5582>

Кафедра будівництва та цивільної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, м. Луцьк, Україна, 43018

С.Я. Дробишинець

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9060-7716>

Кафедра будівництва та цивільної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, м. Луцьк, Україна, 43018

*автор-кореспондент, e-mail: shimchukop@gmail.com

Аналіз шумозахисних споруд, як інженерного облаштування вулиць і доріг та шляхи зменшення шкідливого впливу шуму від транспортних засобів

Цитувати як:

Шимчук О.П., Процюк В.О., Талах Л.О., Дробишинець С.Я. (2025). Аналіз шумозахисних споруд, як інженерного облаштування вулиць і доріг та шляхи зменшення шкідливого впливу шуму від транспортних засобів. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 23, 403-412. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-35](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-35)

© 2025, Шимчук О.П., Процюк В.О., Талах Л.О., Дробишинець С.Я.

Анотація. Проблема зниження шумового навантаження від автомобільного транспорту залишається однією з актуальних як у великих містах, так і в сільських районах, прилеглих до автомагістралей. Традиційні методи шумозахисту – використання бетонних, металевих та композитних екранів – демонструють високу ефективність, проте мають низку суттєвих обмежень: високу вартість виробництва і монтажу, значну вагу конструкцій, обмежену адаптивність до ландшафту, а також відсутність екологічної гнучкості.

У статті розглянуто сучасні підходи до захисту від шуму на автомобільних дорогах та міських вулицях та проаналізовано ефективність існуючих шумозахисних споруд та основні заходи, які можна використати для такого захисту. На основі системного підходу проведено характеристику основних типів шумозахисних екранів, їх конструктивних особливостей, матеріалів, з яких вони виготовляються та можливого впливу на навколишнє природне середовище.

В даній роботі важлива увага приділяється проблемі повторного

використання вторсировини, в якості якої можуть виступати відходи старої гуми (зокрема відпрацьовані автомобільні шини), пінополістиролу та будь-яких інших піноматеріалів.

У статті пропонується використання нового шумозахисного екрану, каркас якого буде виготовлено з дерева, а середина буде заповнена різного роду відходами (гума, пінополістирол, шматки відходів піни), які заливатимуться монтажною піною, яка виконуватиме роль в'язучого. Такий екран буде мати високі шумопоглинаючі властивості.

Даний підхід дозволяє вирішити дві проблеми: зменшити шумове навантаження на прилеглі території до автомобільних доріг та міських вулиць, дозволить утилізувати екологічно проблемні відходи.

Конструкція дерев'яного шумозахисного екрана розглядається як приклад сталого інженерного рішення, яке поєднує екологічність, ефективність та економічну доцільність. Результати даного дослідження можна використати при виконанні проектів будівництва, капітального ремонту та реконструкції дорожньої інфраструктури.

Ключові слова: шумозахист, автомобільні дороги, шумопоглинаючі екрани, вторинна сировина, монтажна піна, екологічна інженерія.

Вступ

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. В зв'язку із постійним зростанням в останні роки кількості автомобільних транспортних засобів гостро постає питання зменшення шуму на автомобільних дорогах та міських вулицях.

Одним із важливих завдань нашого часу являється забезпечення захисту населення від шкідливого впливу шуму, створеного автомобільним транспортом. Значна частина людей стабільно піддається впливу підвищеного шуму. Перевищення нормативних значень шуму мають бути не більше 25 дБА на територіях житлових будинків [1]. Найчастіше вплив шуму на заселені території спостерігається від автомобільного транспорту, який, відповідно до вітчизняних і міжнародних даних, на сьогоднішній день являється однією з найбільш шкідливих фізичних складових [2–3].

Основними причинами виникнення шуму від автомобільного транспорту на автомобільних дорогах є робота двигунів автомобілів, руху транспорту (виникає при взаємодії автомобільної шини з дорожнім покриттям), особливо на великих швидкостях.

Такий шум може сприяти поступовому зниженню слуху, призводити до постійних стресів, розвитку захворювань нервової системи, викликати стан стомлення та занепокоєння, проблеми зі сном, погіршення концентрації та інші проблеми з фізичним та психологічним здоров'ям.

«Роботи дослідників показали, що шум негативно впливає практично на всі системи організму людини, викликаючи в ньому як короточасні, так і тривалі й стійкі функціональні зміни, що призводять до виникнення захворювань серцево-судинної, нервової й іншої систем, а

також ослабленню імунної системи організму. Надмірний шум може стати причиною нервового виснаження, психічної пригніченості, вегетативного неврозу, виразкової хвороби, розладу ендокринної й серцево-судинної систем. Шум заважає людям працювати й відпочивати, знижує продуктивність праці й збільшує травматизм на виробництві й у побуті. Негативний вплив шуму обумовлений його фізичними параметрами (рівень звукового тиску, частота, інтенсивність, тривалість впливу, постійний або непостійний шум тощо), специфікою людського організму (вік, стать, стан здоров'я тощо) та впливом супутніх факторів, які можуть підсилити шкідливий вплив шуму. Транспортний шум впливає на мешканців сельбищної зони, яка розташована поблизу автомобільних доріг, упродовж 15-18 годин на добу. Для сельбищної зони основну проблему становить саме низькочастотний шум, який має досить високу проникну здатність та генерується переважно вантажними автомобілями» [4].

Проблема шуму на автомобільних дорогах, є актуальною та поширеною. Постійне збільшення кількості автомобільного транспорту, розширення мережі автомобільних доріг та підвищення швидкостей руху сприяють підвищенню шумового навантаження на території, які прилягають до автомобільних доріг [5].

Дана проблема набуває все більшої актуальності в усьому світі, вирішення якої потребує комплексного підходу в дорожній галузі, починаючи від проєктування, будівництва, облаштування дорожньої інфраструктури.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи було дослідження та аналіз шумозахисних заходів на територіях, прилеглих до автомобільних доріг та міських вулиць, розробка дерев'яного шумозахисного екрану, який має високі шумопоглинаючі властивості.

Матеріали та методи

В статті проаналізовано сучасні шумозахисні заходи, які використовуються на автомобільних дорогах, запропоновано використання нового шумопоглинаючого екрану з використанням відходів деяких матеріалів.

До об'єктів дослідження відносимо шумозахисні споруди та заходи, існуючі та запропоновані для використання на автомобільних дорогах з метою зниження впливу транспортного шуму на людей та довкілля.

Методологічно використано еколого-інженерний підхід, завдяки якому можливо розглядати комплексно ефективність шумозахисту та повторного використання відходів (старої гуми, пінополістиролу піноматеріалів (меблевих, пакувальних) і т.д.). Такий підхід дозволяє вирішити одночасно два завдання: зменшення рівня шуму на автомобільних дорогах та утилізація відпрацьованих матеріалів.

Дана конструкція може бути адаптована під будь-які кліматичні та ландшафтні умови, а також може виготовлятися з дерева невисокої якості.

Результати та обговорення

Аналіз використання сучасних шумозахисних заходів на автомобільних дорогах вказує на широке застосування планувальних, інженерно-технічних та інших заходів, а саме:

- використання багаторівневої організації дорожнього руху та підземного простору;
- зонування територій із розміщенням житлової забудови на віддаленні від магістралей;
- створення зелених шумозахисних зон (ефективність до 10–12 дБ при посадці в кілька рядів);
- застосування будівель різного призначення як акустичних бар'єрів;
- впровадження шумозахисних екранів із різних матеріалів (бетон, скло, метал, пластик);
- використання земляних насипів, кавальєрів і інших ландшафтних рішень.

Серед вищезазначених найдоступнішим, і водночас, найефективнішим для застосування на території України вважається метод установа шумозахисних екранів вздовж автомобільних доріг, особливо в місцях, що прилягають до житлової та рекреаційної забудови.

В зв'язку з вищевказаним пропонується для зниження рівня шуму, встановлювати дерев'яні шумозахисні споруди, оскільки вони будуть менш дороговартісними, в порівнянні з аналогами.

Такі шумозахисні екрани (рис. 1) можна виготовляти із деревини нижчих сортів.

Крім того пропонується використати каркасну конструкцію з деревини як екологічного, поновлюваного матеріалу, а внутрішнє заповнення здійснити відпрацьованими матеріалами з шматочків гуми, фрагментів пінополістиролу, залишків піноматеріалів, які зафіксувати монтажною піною, що забезпечить зв'язування компонентів, утворюючи пористу структуру з високими звукопоглинаючими властивостями. При цьому суттєво зменшиться собівартість шумозахисного екрана.

Тому приводимо розрахунок шумозниження екрану залежно від різних шляхів проходження звуку.

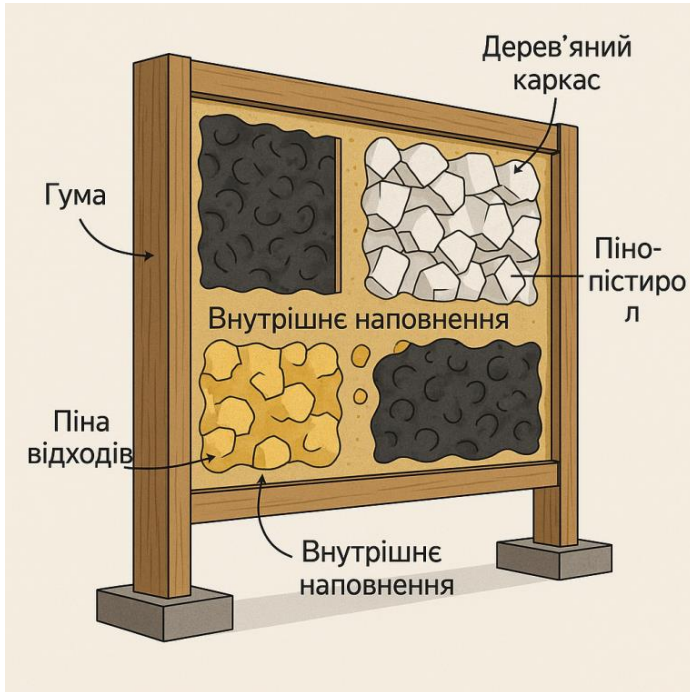


Рис. 1. Дерев'яний шумопоглинаючий екран

Акустична ефективність екрану буде залежати від різниці довжини шляхів звукового променя δ , яку визначатимемо відповідно до схеми, яка представлена на рис. 2, за формулою:

$$\delta = a + b + c \quad (1)$$

де δ – різниця довжин шляхів променя звуку, м;

a – найменша відстань між центром акустики джерела шуму та верхнім краєм екрану, м;

b – найменша відстань від верхнього краю екрану до розрахункової точки, м;

c – найменша відстань від центру акустики джерела шуму до розрахункової точки, м.

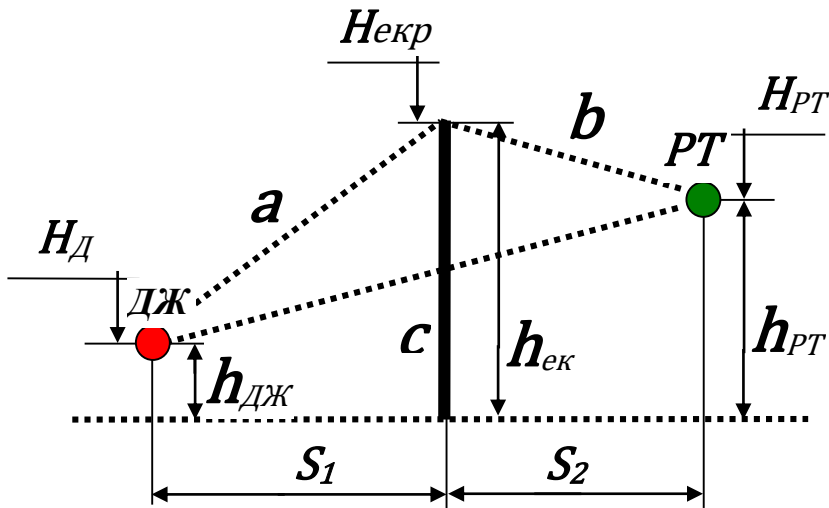


Рис. 2. Схема для визначення різниці шляху δ для шумозахисного екрана

Віддаль a , b і c визначаємо за формулами:

$$a = \sqrt{S_1^2 + (h_{екр} - h_{ДЖ})^2} \quad (2)$$

$$b = \sqrt{S_2^2 + (h_{екр} - h_{РТ})^2} \quad (3)$$

$$c = \sqrt{(S_1 + S_2 + (h_{РТ} - h_{ДЖ}))^2}, \quad (4)$$

тут $h_{ДЖ}$ - висота джерела шуму вище рівня проїзної частини, м;

$h_{екр}$ - висота екрану, м;

$h_{РТ}$ - висота точки розрахунку над рівнем землі, м;

S_1 - віддаль до екрану джерела шуму, м;

S_2 - віддаль до точки розрахунку від екрану, м.

Під час розрахунків положення центру акустичного джерела шуму встановлюється на висоті 1,00 м в порівнянні із рівнем проїзної частини. Для доріг із двома смугами руху він розташовується на осі проїжджої частини, а для багатосмугових доріг — на осі тієї смуги, яка найбільше віддалена від розрахункової точки.

Ефективність шумозахисного екрана визначається залежно від різниці шляхів поширення звуку δ згідно з наступною формулою:

$$\Delta L_{екр} = 18,2 + 7,8 \lg(\delta + 0,2) \quad (5)$$

тут $\Delta L_{екр}$ - пониження шуму екрана, дБА;

δ – різниця відстані від джерела появи шуму до точки розрахунку та найменшою по довжині прямою лінією між ними, м.

Попередній техніко-технологічний аналіз засвідчив, що запропонована конструкція потенційно здатна досягати зниження рівня шуму на 10–15 дБ, що є порівняним із традиційними бетонними або композитними екранами. Водночас значною перевагою є екологічна доцільність, рішення – повторне використання відходів, які інакше створювали б загрозу для довкілля (нерозкладна гума, пінополістирол, монтажні залишки піноматеріалів тощо).

Запропонована конструкція також є відносно легкою, що спрощує транспортування та монтаж, а також дозволяє встановлювати екрани на ділянках з обмеженим фундаментом простором.

Таким чином, інноваційний шумозахисний екран:

- забезпечує зниження шумового впливу,
- сприяє утилізації техногенних відходів,
- являється економічно вигідним у порівнянні з традиційними рішеннями.

Результати цього дослідження можуть бути враховані при подальших експериментальних випробуваннях конструкції, зокрема з оцінкою акустичних характеристик, довговічності матеріалів та поведінки в різних кліматичних умовах.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на:

- експериментальну перевірку звукопоглинальних властивостей конструкції;
- оцінку її довговічності та стійкості до кліматичних впливів;
- розробку типових конструктивних рішень для різних умов експлуатації;
- аналіз техніко-економічної ефективності впровадження.

Висновки

У статті проведено системний аналіз сучасних шумозахисних заходів, що застосовуються на автомобільних дорогах, а також запропоновано інноваційну конструкцію шумопоглинаючого екрана, який поєднує в собі функціональність, екологічність та доступність.

Запропонована конструкція шумозахисного екрана, що складається з дерев'яного каркасу та заповнення з утилізованих відходів (гума, пінополістирол, піноматеріали), є перспективною як з точки зору акустичних характеристик, так і з позиції екологічної та економічної ефективності.

Така конструкція дозволяє поєднати завдання захисту від шуму з утилізацією твердих побутових відходів, що частково вирішує і екологічну проблему.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. GBN V.2.3-37641918-556:2015. Motorways. Noise-proof structures. Design requirements. – Kyiv: Ministry of Infrastructure of Ukraine, 2015. – 29 p.
2. Gilov V. V. Ensuring the environmental safety of the industrial region. Bulletin of the Pridneprovskaya State Academy of Science and Architecture. Dnipropetrovsk, 2015. No. 4 (205). P. 62–67.
3. Gilov V. V. Assessment of the quality and safety of life of the population living in an area with multi-storey buildings by the noise pollution factor. International Scientific Journal. Kyiv, 2015. No. 1. P. 14–17.
4. Shestopalova L. M. Fundamentals of life safety. -K.: Yurinkom Inter, 2001. – 96 p.
5. Vitaliy Kovalchuk. Noise protection measures on highways. Roads and bridges. Kyiv, 2023. Issue 28. P. 265–274.
6. Lecture notes on the discipline “Engineering arrangement of streets and roads” for applicants of the first (bachelor’s) level of higher education of the educational and professional program “Construction and civil engineering” of the field of knowledge 19 Architecture and construction of the specialty 192 Construction and civil engineering of full-time and part-time forms of study /compilation. O.P. Shymchuk, V.O. Protsyuk – Lutsk: Lutsk NTU, 2021. – 144 p.
7. DBN V.1.1-31:2013. Noise protection. Basic provisions of design. – Kyiv: Minregion of Ukraine, 2013. – 22 p.
8. DBN V.2.3-4:2015. Motorways. Part II. Design. – Kyiv: Minregion of Ukraine, 2015. – 54 p.
9. Acoustics and sound insulation in urban planning / Ed. V.I. Shepitka. – Kyiv: KNUBA, 2018. – 176 p.
10. Bondarenko, S.V., Luk’yanenko, M.M. Use of household waste in building structures: environmental feasibility and prospects // Environmental safety and balanced resource use. – 2021. – No. 1(29). – P. 58–63.

Література

1. ГБН В.2.3-3764:1918-556:2015. Автомобільні дороги. Споруди шумозахисні. Вимоги до проектування. – Київ: Міністерство інфраструктури України, 2015. – 29 с.
2. Гільов В. В. Забезпечення екологічної безпеки промислового регіону. Вісник Придніпровської державної академії архітектури. Дніпропетровськ, 2015. №4 (205). С. 62–67.
3. Гільов В.В. Оцінка якості та безпеки життєдіяльності населення, яке проживає на території з багатоповерховою забудовою за фактором шумового забруднення. International Scientific Journal. Київ, 2015. № 1. С. 14–17.
4. Шестопалова Л. М. Основи безпеки життєдіяльності. -К.: Юрінком Інтер, 2001. – 96 с.
5. Віталій Ковальчук. Заходи захисту від шуму на автомобільних дорогах. Дороги і мости. Київ, 2023. Вип. 28. С. 265–274.
6. Конспект лекцій з дисципліни «Інженерне облаштування вулиць і доріг» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньо-професійної програми «Будівництво та цивільна інженерія» галузі знань 19 Архітектура та будівництво спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія денної та заочної форм навчання /уклад. О.П. Шимчук, В.О. Процюк – Луцьк: Луцький НТУ, 2021. – 144 с.
7. ДБН В.1.1-31:2013. Захист від шуму. Основні положення проектування. – Київ: Мінрегіон України, 2013. – 22 с.
8. ДБН В.2.3-4:2015. Автомобільні дороги. Частина II. Проектування. – Київ: Мінрегіон України, 2015. – 54 с.
9. Акустика та звукоізоляція у містобудуванні / За ред. В.І. Шепітька. – Київ: КНУБА, 2018. – 176 с.
10. Бондаренко, С.В., Лук'яненко, М.М. Використання побутових відходів у будівельних конструкціях: екологічна доцільність та перспективи // Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування. – 2021. – № 1(29). – С. 58–63.

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 23.05.2025	Received 23.05.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 23.05.2025	Received in revised form 23.05.2025
Прийнято 02.06.2025	Accepted 02.06.2025
Опубліковано 25.06.2025	Published 25.06.2025

O.P. Shymchuk*

PhD, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0564-2673>
Department of Civil Engineering and Construction
Lutsk National Technical University, 75 Lvivska St., Lutsk, Ukraine, 43018

O.V. Protsyuk

PhD, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2644-9490>
Department of Civil Engineering and Construction
Lutsk National Technical University, 75 Lvivska St., Lutsk, Ukraine, 43018

L.O. Talakh

PhD, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4643-5582>
Department of Civil Engineering and Construction
Lutsk National Technical University, 75 Lvivska St., Lutsk, Ukraine, 43018

Ukraine, 43018

S.Y. Drobyshynets

PhD, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9060-7716>

Department of Civil Engineering and Construction

Lutsk National Technical University, 75 Lvivska St., Lutsk, Ukraine, 43018 Lvivska, 75, Lutsk, Ukraine, 43018

*corresponding author, e-mail: shimchukop@gmail.com

Analysis of noise protection structures as engineering arrangement of streets and roads and ways to reduce the harmful effects of noise from vehicles

How to Cite:

Shymchuk O.P., Protsyuk V.O., Talakh L.O., Drobyshynets S.Y. (2025). Analysis of noise protection structures as engineering arrangement of streets and roads and ways to reduce the harmful effects of noise from vehicles. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 23, 403-412. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-35](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-35)

Abstract. The problem of reducing noise pollution from road transport remains one of the most relevant in both large cities and rural areas adjacent to highways. Traditional methods of noise protection - the use of concrete, metal and composite screens - demonstrate high efficiency, but have a number of significant limitations: high cost of production and installation, significant weight of structures, limited adaptability to the landscape, as well as lack of environmental flexibility.

The article considers modern approaches to noise protection on highways and city streets and analyzes the effectiveness of existing noise protection structures and the main measures that can be used for such protection. Based on a systematic approach, the main types of noise protection screens, their design features, materials from which they are made, and possible impact on the environment are characterized. In this work, important attention is paid to the problem of reusing recycled materials, which can be waste of old rubber (in particular, used car tires), polystyrene foam and any other foam materials.

The article proposes the use of a new noise protection screen, the frame of which will be made of wood, and the middle will be filled with various types of waste (rubber, polystyrene foam, pieces of foam waste), which will be filled with mounting foam, which will act as a binder. Such a screen will have high noise-absorbing properties.

This approach allows solving two problems: reducing the noise load on the areas adjacent to highways and city streets, and allowing the disposal of environmentally problematic waste.

The design of a wooden noise barrier is considered as an example of a sustainable engineering solution that combines environmental friendliness, efficiency and economic feasibility. The results of this study can be used in the implementation of construction projects, major repairs and reconstruction of road infrastructure.

Keywords: noise protection, highways, noise-absorbing screens, secondary raw materials, foam, environmental engineering.

УДК 629.113:072

Н.В. Ярещенко

к.тн., доцент., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0778-1474>

Кафедра будівництва та експлуатації автомобільних доріг

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, Харків, Україна, 61002

Параметри моделі групової поведінки водіїв на автомобільних дорогах

Цитувати як:

Ярещенко Н.В. (2025) Дослідження параметрів моделі групової поведінки водіїв на автомобільних дорогах. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 23, 413-421. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-36](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-36)

© 2025, Ярещенко Н.В.

Анотація У статті проведено аналіз системи Людина – Автомобіль – Дорога - Середовище є важливою частиною при будівництві автомобільних доріг та для подальшого розвитку міжнародних транспортних коридорів між Європейськими країнами. Важливим моментом при цьому є взаємовідносини між поведінкою водіїв. Пропонується розглянути параметри моделі групової поведінки водіїв, для оцінки суспільно необхідної продуктивності водіїв на автомобільних дорогах.

У статті «Параметри моделі групової поведінки водіїв» розглядається питання динаміки розрахункових характеристик транспортного потоку, а саме фактичних і суспільно необхідних швидкостей руху та їх аналіз.

Проведені дослідження фактичної та суспільно необхідної швидкості руху на автомобільних дорогах дозволили автору припустити, що за динамікою розрахункових характеристик можна судити про закономірності еволюції автомобільних доріг.

Важливим завданням проектування автомобільних доріг є довгострокове прогнозування розрахункових характеристик транспортних потоків. Однією з проблем є проблема прогнозування реальних і суспільно необхідних швидкостей руху на автомобільних дорогах.

Швидкість руху системи «людина-автомобіль» у навколишньому середовищі відображає взаємозв'язок між компонентами системи управління аварійністю, оскільки є результатом її функціонування. Тому швидкість можна розглядати як параметр стану даної системи. В якості координати стану доцільно використовувати ймовірність переходу від фактичної швидкості до заданої.

У структурі параметрів стану задану швидкість слід розглядати як нормальну, тобто найбільш узгоджену з цілями та завданнями функціонування системи реагування на надзвичайні ситуації на даному етапі її розвитку.

Координати стану можна використовувати як вагові коефіцієнти в моделі прогнозування швидкості руху.

Модель еволюції замкнутої системи Людина – Транспортний засіб – Дорога – Середовище можна представити у вигляді системи диференціальних рівнянь, що відображають динаміку абсолютної організації її компонентів.

З поступовим поліпшенням умов руху (поетапне будівництво, реконструкція, капітальний ремонт) індивідуальна норма швидкості водія прагне до функціональної норми швидкості за мотивом свободи дій. Остання дорівнює двом третинам розрахункової швидкості автомобіля.

Експериментальні дослідження підтвердили справедливості формул для оцінки параметрів моделі прогнозування.

Модель прогнозування швидкості руху адекватна спостережуваним даним щодо динаміки проектування, та проектування нормальних швидкостей для водіїв.

Виявлено, що вирішення цієї проблеми можливе шляхом аналізу еволюції зв'язків між компонентами системи «людина-автомобіль-транспортне середовище».

Ключові слова: групова поведінка водіїв, математична модель, автомобіль, система, автомобільна дорога.

Вступ

Аналіз системи Людина – Автомобіль – Дорога - Середовище є важливою частиною при будівництві автомобільних доріг та для подальшого розвитку міжнародних транспортних коридорів між Європейськими країнами. Важливим моментом при цьому є взаємовідносини між поведінкою водіїв. Пропонується розглянути параметри моделі групової поведінки водіїв, для оцінки суспільно необхідної продуктивності водіїв на автомобільних дорогах.

Мета і завдання дослідження - оцінити параметри групової поведінки водіїв, що дозволить розрахувати суспільно необхідні планові завдання на вантажні перевезення для водіїв на автомобільних дорогах.

Огляд досліджень. Параметрами моделі групової поведінки водіїв є:

- 1) індивідуальна норма продуктивності W_{ni} ;
- 2) жорсткість індивідуальної норми продуктивності m_i .

Групова норма продуктивності може бути визначена як середньоарифметична з індивідуальних норм

$$W_{ГН} = \frac{\sum_{i=1}^I W_{ni}}{I}, \quad (1)$$

де $W_{ГН}$ - групова норма продуктивності;

I - число водіїв у групі.

В свою чергу сумарна гнучкість індивідуальних норм продуктивності легко визначається через жорсткості індивідуальних норм:

$$S = \sum_{i=1}^I (1/m_i), \quad (2)$$

де S - сумарна гнучкість індивідуальних норм продуктивності.

Тому для оцінки суспільно необхідної продуктивності [1] i -того водія достатньо оцінити два параметра моделі групової поведінки W_{ni} та m_i .

Експериментально параметри моделі оцінювалися на основі аналізу виконання місячних завдань на вантажні перевезення водіїв міста Харкова. Фактичне виконання планових завдань і сам план оцінювалися транспортною роботою в т.км/місяць. Місячний план для роботи водіїв складав $R=5940.552$ т.км/місяць.

Таблиця 1 Характеристики водіїв

Водії	Вік	Клас	Освіта.	Стаж		Порушення трудової дисципліни бал.
				Всього, років	У компанії, років	
1	32	2	8	14	10	2
2	37	2	10	19	15	4
3	43	2	10	24	24	3
4	45	1	10	26	4	4
5	42	1	9	23	5	2
6	46	2	7	18	18	4

Індивідуальні норми планових завдань визначалися як крапки на шкалі $W_{пл}$, в яких відхилення фактичного об'єму вантажних перевезень від планового перетворювалися у нуль

$$\Delta W = W_{ф} - W_{пл} = 0, \quad (3)$$

де ΔW - відхилення об'єму вантажних перевезень від заданого;

$W_{ф}$ - фактичний об'єм вантажних перевезень, т.км.;

$W_{пл}$ - плановий (заданий) об'єм вантажних перевезень, т.км.

Величина ΔW в подальшому використовувалася для оцінки мотиваційних сил та сили мотивації дій водія. [2]

Позитивне відхилення ΔW^+ використовувалося для оцінки сили мотивації вигоди, негативне ΔW^- використовувалося для оцінки сили

мотивації безпеки руху. Сума відхилень ($\Delta W = \Delta W^+ + \Delta W^-$) - для оцінки сили мотивації дій.

Жорсткість індивідуальної норми вантажних перевезень оцінювалася тангенсом кута нахилу зв'язку $\Delta W = f(W_{\text{пл}})$ до осі О $W_{\text{пл}}$. Аналогічно оцінювалися і жорсткості функціональних норм вантажних перевезень для мотивації безпеки руху та мотивації вигоди. Гнучкість зв'язків оцінювалася як величина зворотна жорсткості.

Середньозважена індивідуальна норма планового завдання виявилася рівною 297,0276 т.км. Стосовно (1) даний об'єм вантажних перевезень чисельно дорівнює груповій нормі продуктивності діяльності водіїв.

$W_{\text{ГН}} = 297,0276$ т.км

Середньоквадратичне відхилення фактичних об'ємів вантажних перевезень, здійснюваних окремими водіями, від середнього склало

$\delta = 14,79111$ т.км., а коефіцієнт варіації $k_{\text{в}} = 4,98\%$.

Якщо прийняти задану точність оцінок фактичної продуктивності діяльності водіїв рівною 5%, то при ймовірності рівної 0,95 та $\alpha_{\text{ст}} = 2,11$ мінімальний об'єм оцінок повинен скласти

$N_{\text{min}} = (k_{\text{в}} 2\alpha_{\text{ст}}) / \Delta 2 = (4,982 \cdot 2,112) / 52 = 4,4$ вимірювання

Так як фактичний об'єм вибірки склав 6, то цього достатньо для отримання достовірних результатів.

Аналіз оцінок сили мотивації діяльності водіїв показав наявність лінійного зв'язку сили з величиною планового завдання, табл.3. Коефіцієнт парної кореляції між цими величинами коливається в межах від -0,52 до -0,929, що свідчить про середню та сильну тісноту цього зв'язку.

Багатофакторний регресійний аналіз [3] зв'язку жорсткості індивідуальних норм планових завдань з особистісними характеристиками водіїв дозволили встановити емпіричне рівняння цього зв'язку у вигляді:

$$m_i = 3,655 - 0,114x_1 - 0,151x_2 - 0,307x_3 + 0,267x_4, \quad (4)$$

де m_i - жорсткість індивідуальної норми вантажних перевезень;

x_1 - кваліфікація водія (клас);

x_2 - освіта (середня школа);

x_3 - дисциплінованість, бали;

Коефіцієнт множинної кореляції дорівнює 0,392, критерій адекватності Фішера дорівнює 0,608, толерантність дорівнює 0,616.

Залежності мотиваційних сил від величини планового завдання наведені на рис.1.

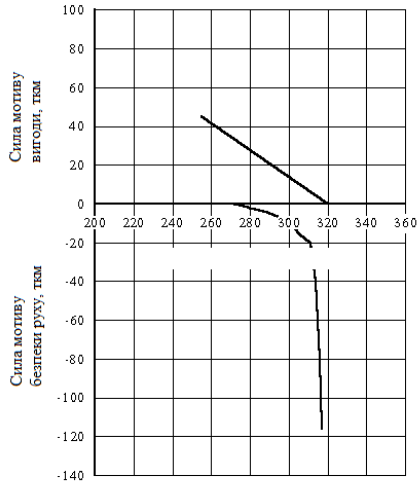


Рис. 1. Вплив величини планового завдання на сили мотивації діяльності водіїв

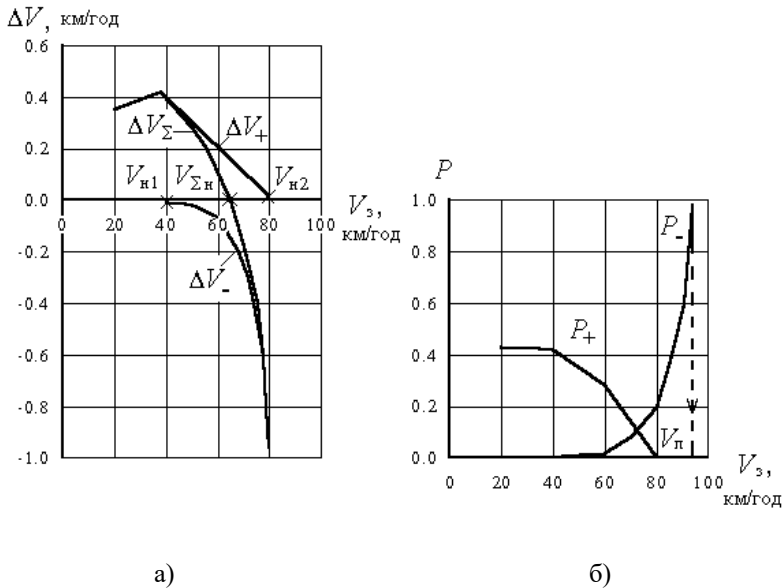


Рис. 2. Сила (а) та частота (б) дії мотивації діяльності водія на ділянці дороги

Аналіз цих залежностей показує, що зв'язок $\Delta W^+ = f(W_{пл})$ лінійний.

Норма продуктивності дії середнього водія для мотивації вигоди $W=320$ т.км. Жорсткість цієї норми дорівнює

$$m_B = -0,717.$$

Зв'язок негативного відхилення ΔW - з плановим завданням $W_{\text{пл}}$ виявився суттєво нелінійним. Але, якщо припустити, що практично планування вантажних перевезень здійснюється в межах функціональних норм, то в цьому інтервалі можливо допустити наявність лінійного зв'язку $\Delta W = f(W_{\text{пл}})$, табл. 2.

Таблиця 2 Сила мотивації та норми планових завдань для водіїв

Водії	Норма планового завдання, т.км	Жорсткість індивідуальної норми, m_i	Гнучкість індивідуальної норми, $1/m_i$	Зв'язок сили мотивації з величиною планового завдання	Коефіцієнт парної кореляції
1	302,666	-2,813	-0,3554923	$\Delta W = 851,4 - 2,813 W_{\text{пл}}$	-0,604
2	283,62	-2,015	-0,4962779	$\Delta W = 571,5 - 2,015 W_{\text{пл}}$	-0,876
3	336,94	-2,339	-0,4275331	$\Delta W = 788,1 - 2,339 W_{\text{пл}}$	-0,618
4	297,415	-0,967	-1,034126	$\Delta W = 28766 - 0,967 W_{\text{пл}}$	-0,672
5	279,057	-2,588	-0,3863987	$\Delta W = 722,2 - 2,588 W_{\text{пл}}$	-0,928
6	286,348	-2,864	-0,349162	$\Delta W = 820,1 - 2,864 W_{\text{пл}}$	-0,929
			$S = -3,69435$		

Тому жорсткість даного зв'язку можна прийняти рівною $m_B = -0,425$.

Функціональна норма продуктивності діяльності водія для мотивації безпеки руху дорівнює $W_{\text{нб}} = 280$ т.км.

Таким чином, індивідуальна норма продуктивності діяльності середнього водія дорівнює

$$W_H = (m_B W_{\text{нб}} + m_B W_{\text{нб}}) / (m_B + m_{\text{нб}}) = [-0,717 \cdot 320 + (-0,425) \cdot 280] / (-0,714 - 0,425) = 305,82 \text{ т.км}, \quad (5)$$

що близько до експериментальної оцінки групової норми продуктивності. Відхилення розрахункової норми продуктивності від експериментальної

дорівнює 2,875 %, що не перевищує 5 % межі допустимої в техніко-економічних оцінках.

Отже, припущення лінійності зв'язку $\Delta W = f(W_{\text{пл}})$ в інтервалі функціональних норм можна рахувати правомочним.

Оцінка параметрів групової поведінки водіїв дозволила розрахувати суспільно необхідні планові завдання на вантажні перевезення для водіїв (табл. 3).

Таблиця 3 Суспільно необхідні об'єми вантажних перевезень водіями

№ водіїв	$\tilde{W}_{\text{пл}}$ т.км в місяць
1	299,88
2	290,34
3	317,03
4	297,33
5	297,08
6	291,73

Результати досліджень

Аналіз оцінок сили мотивації діяльності водіїв показав наявність лінійного зв'язку сили з величиною планового завдання.

Багатофакторний регресійний аналіз зв'язку жорсткості індивідуальних норм планових завдань з особистісними характеристиками водіїв дозволили встановити емпіричне рівняння.

Висновки

При поступовому поліпшенні умов руху (стадійне будівництво, реконструкція, капітальний ремонт) індивідуальна норма швидкості руху водія прагне функціональної норми швидкості мотивації свободи дій.

Експериментальні дослідження підтвердили справедливність формул з метою оцінки параметрів моделі прогнозування.

Конфлікти інтересів

Автор заявляє, що у нього немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автор підтверджує, що при створенні поточної роботи він не використовував технології штучного інтелекту.

References

1. Gavrilov E.V., Dmutrichenko M.F., Sustemologiya na transporti. Organizaciya doroznogo ruju. Vud-vo Znanny Ukrainu.2007.-450 s.
2. Gavrilov E. V., Gridin A.M., Rypujin V.M. Sistemne proektuvania avtomobilnij dorog. Vid. ASB. 1998. -138 s.
3. Klepenko V.U., Golez V.L.,Vischa matematika v prikladaj I zadachaj. Navchalnij posibnik. Vidavnistvo Zentr uchbovoy literature. 2021. 594 s.

Література

1. Гаврилов Е.В., Дмитриченко М.Ф. Системологія на транспорті. Організація дорожнього руху. Вид-во Знання України, 2007. -450 с.
2. Гаврилов Е.В., Грідін А.М., Ряпухін В.М. Системне проектування автомобільних доріг. Вид. АСБ, 1998 р., - 138 с.
3. Клепенко В.Ю., Голець В.Л., Вища математика в прикладах і задачах. Навчальний посібник. Видавництво Центр учбової літератури. 2021. 594 с.

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 19.02.2025	Received 19.02.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 12.05.2025	Received in revised form 12.05.2025
Прийнято 01.06.2025	Accepted 01.06.2025
Опубліковано 25.06.2025	Published 25.06.2025

N.V. Yareshchenko

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0778-1474>
Department: Construction and operation of highways
Kharkiv National Automobile and Road University, Yaroslava Mudrogo St., 25, Kharkiv, Ukraine, 61002

Parameters of the group behavior model of drivers on motor roads

How to Cite:

Yareshchenko N.V. (2025). Research on parameters of the group behavior model of drivers on motor roads. *Modern technologies and calculation methods in construction*, 23, 413-421.
[https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-36](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-36)

Abstract. The analysis of the human-vehicle-road-environment system is an important part of the construction of highways and the further development of international transport corridors between European countries. An important point here is the relationship between the behavior of drivers. It is proposed that the parameters of the model of the group behavior of drivers be considered to assess the socially necessary performance of drivers on highways.

The article "Parameters of the model of the group behavior of drivers" deals with the issue of the dynamics of the calculated characteristics of the traffic flow, namely the actual and socially necessary speeds of movement and their analysis.

The conducted studies of the actual and socially necessary speed of movement on highways allowed the author to assume that the dynamics of the calculated characteristics can be used to judge the laws of the evolution of highways.

An important task of highway design is the long-term forecasting of the calculated characteristics of traffic flows. One of the problems is the problem of forecasting the actual and socially necessary speeds of traffic on highways.

The speed of movement of the "man-car" system in the environment reflects the relationship between the components of the emergency control system, since it is the result of its functioning. Therefore, speed can be considered as a state parameter of a given system. It makes sense to use the probability of transition from the actual to the given speed as the state coordinate.

In the structure of state parameters, the given speed should be considered as normal, i.e., most consistent with the goals and objectives of the functioning of the emergency response system at this stage of its evolution.

State coordinates can be used as weighting coefficients in a motion speed prediction model.

A model of the evolution of a closed-state Human - Vehicle - Road - Environment system can be represented as a system of differential equations reflecting the dynamics of the absolute organization of its components.

With gradual improvement of traffic conditions (phased construction, reconstruction, major repairs), the driver's individual speed norm tends to the functional speed norm for the purpose of freedom of action. The latter is equal to two-thirds of the design speed of the vehicle.

Experimental studies have confirmed the validity of the formulas for estimating the parameters of the forecasting model.

The model for predicting traffic speeds is adequate for the observed data on the dynamics of design, design and normal speeds for drivers.

It was found that the solution to this problem is possible by analyzing the evolution of the relations between the components of the "man-car-traffic environment" system.

Keywords: group behavior of drivers, automobile, highway, mathematical model, system.

З М І С Т

Андрійчук О.В., Громов Д.Ю.	Моделювання роботи сталевібробетонних конструкцій методом скінченних елементів.....	5
Арінушкіна О.О., Костін Д.Ю.	Дослідження оптимальної концентрації поліпропіленових фіброволокон у крупнозернистих щебенево-піщаних сумішах, укріплених цементом.....	19
Бандура І.О., Романюк М.В., Грицюк І.В., Грицюк Ю.В., Коменда Н.В., Волинець В.І.	Підготовка енергоаудиторів будівель відповідно до нового професійного стандарту: стан, виклики та перспективи.....	31
Білов Ю.О.	Аналітико-теоретичні засади оптимізації організаційних будівельних процесів.....	39
Білошицька Н.І., Татарченко Г.О., Білошицький М.В., Уваров П.Є.	Шляхи повоєнної відбудови транспостної інфраструктури.....	48
Бондаренко О.В., Майстренко О.Ф., Марченко Т.І., Іванова О.М.	Проблеми експлуатаційної надійності монолітних будівель та споруд при недотриманні вимог послідовного бетонування.....	57
Бондарський О.Г., Ужегова О.А., Дробишинець С.Я. Денейчук В.Є., Формазюк В.І.	Моделювання та розрахунок тришарової складеної оболонки типу «конус-циліндр- конус».....	66
Величкович А.С., Андрусак А.В., Козак О.В., Палійчук І.І., Кулай В.В.	Числове моделювання несучого профнастилу із застосуванням еквівалентної ортотропної пластини.....	75

Величкович А.С., Андрусак А.В., Сільчук Д.В.	Оцінка властивостей крупних заповнювачів із дроблених гірських порід західного регіону України для виготовлення бетонних сумішей.....	89
Зятюк Ю.Ю., Поліщук О.М.	Дослідження роботи фібробетону при використанні різних армуючих волокон.....	105
Івасенко В.О., Завальний О.В.	Аналіз нормативних вимог щодо проектування перетинів з урахуванням безпекових умов у міському середовищі.....	114
Коменда Н.В., Грицюк І.В., Волинець В.І., Гадай А.В., Коменда Д.Т.	Наукові підходи до оцінки енергоефективності будівель.....	123
Куцик С.Л., Мікуліч О.А., Гусачук Д.А.	Вплив технічних умов виробництва на механічні властивості 3D друківаних полімерних елементів.....	132
Лапченко А.С.	Вплив меленого домого шлаку та пластифікуючої добавки на міцнісні властивості дорожнього бетону.....	143
Михайловський Д.В., Комар М.А., Гомон П.С.	Чисельне моделювання деформування армованих дерев'яних балок з цільної та клеєної деревини.....	155
Мікуліч О.А., Фурс Т.В., Войтюк І.М.	Дослідження зміни механічних характеристик під впливом ультрафіолету у жорстких пінополіуретанах.....	171
Олевич Ю.В., Величкович А.С., Андрусак А.В., Палічук І.І.	Числовий аналіз міцності та жорсткості багатопустотної плити зі швидкотверднучого високоміцного бетону.....	182
Пахолок О.А., Самчук В.П., Чапук О.С., Малиха В.І.	Утеплення будівель із фасадами складної конфігурації.....	196

Пиріг Я.І., Оксак С.В., Ільїн Я.В., Місніченко С.О.	Особливості проектування складу литих асфальтобетонів.....	210
Пустюльга С.І., Самчук В.П., Бондарчук Ю.С., Заразка М.В.	Параметризм як стиль в архітектурі та дизайні: концепція, методологія, комп'ютерний інструментарій та перспективи розвитку.....	222
Русецька М.В., Бакулін Є.А.	Сендвіч-панелі з базальтовим, мінераловатним і пінополістирольним утеплювачем: порівняльний аналіз властивостей на основі експериментальних досліджень.....	240
Самоненко І.В.	Ефективне планування розкладу для автобусних маршрутів із зоною накладання.....	250
Самоненко І.В.	Баєсівський підхід до оцінки діаметра кіл за довжиною хорд.....	264
Сєдов А.В., Фоменко О.О.	Дослідження впливу споживчих властивостей горизонтальної розмітки на безпеку дорожнього руху.....	273
Синій С.В. Гупік Н.В., Ксьоншкевич Л.М., Крантовська О.М., Ужегова О.А., Ротко С.В.	Особливості методики інтеграції інженерних мереж з тепловим насосом у будівлю в долині річки Сапалаївки у м. Луцьку.....	285
Смаль М.В., Волчук О.В., Дзюбинська О.В., Сунак П.О., Дробишинець С.Я.	Інтеграція скла в архітектуру та розвиток урбаністичного простору міст.....	301
Смолянюк Р.В.	Розробка нової технології визначення параметрів зчеплення колеса автомобіля з дорожнім покриттям.....	311

Смоляр А.М., Мірошкіна І.В., Середенко Б.В.	Натурний експеримент та комп'ютерне моделювання згину балки з будівельним вигином.....	321
Соколенко К.В., Швидкий Д.В., Соколенко В.М., Морозенко М.О.	Містобудівні завдання та принципи трансформації планувально-транспортного каркасу урбанізованих територій сходу України.....	331
Степанюк В.О., Смаль М.В., Дзюбинська О.В., Дзюбинський А.В. Смаль О.В.	Дослідження дорожньо-транспортної мережі міста Луцька.....	344
Уль А.В., Мельник О.В., Мельник Ю.А., Вакулюк Л.А.	Взаємозв'язок між температурою земної поверхні та характеристиками земного покриву міста Луцьк: аналіз часових рядів супутникових індексів Landsat.....	353
Фоменко О.О. Сєдов А.В.	Використання золошлакових сумішей для будівництва шарів основи дорожнього одягу	370
Фостащенко О.М., Добровольська О.Г., Фостащенко Д.О.	Впровадження нормативних, санітарно-технічних та ландшафтно-містобудівних заходів для відновлення малих річок Запорізького регіону.....	381
Чапюк О.С., Гомон О.О., Петренко О.В.	Особливості роботи модифікованої епоксидною смолою деревини хвойних порід.....	395
Шимчук О.П., Процюк О.В., Талах Л.О., Дробишинець С.Я.	Аналіз шумозахисних споруд, як інженерного облаштування вулиць і доріг та шляхи зменшення шкідливого впливу шуму від транспортних засобів.....	403
Ярещенко Н.В.	Параметри моделі групової поведінки водіїв на автомобільних дорогах.....	413
	..	

Наукове видання

Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві

Збірник наукових праць

Випуск 23

Видається двічі на рік

Верстка С.В. Ротко

Матеріали друкуються в авторській редакції. За стилістику та орфографію статей відповідальність несуть автори

Підписано до друку 24.06.2025 р. Формат 60 × 84 1/16.

Папір офсетний. Цифровий друк. Ум. друк. арк. 26,7.

Тираж 100 пр. Зам. № _____

Віддруковано з готового оригінал-макета.

Видавництво – Видавничий дім «Гельветика»

65101, Україна, м. Одеса, вул. Інглєзі, 6/1

Телефони: +38(095)9344828, +38(097)7230608

Е-mail: mailbox@helvetika.ua

Свідомство суб'єкта видавничої справи

ДК № 7623 від 22.06.2022 р.